



Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät

Institut für Physik
Abteilung Didaktik der Physik
Leitung: Dr. Franz-Josef Heizler

Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne

äußeres Magnetfeld

- wissenschaftliche Erklärungsversuche und

ein Unterrichtsentwurf

Zulassungsarbeit zum ersten Staatsexamen für das Lehramt an Realschulen
vorgelegt von Julian Steger

Abgabe am: 15.3.2015

I. Inhaltsverzeichnis:

1. Vorwort	S.1
2. Beschreibung des Effekts	S.2
2.1. Entdeckung des Effekts	S.2
2.2. Erklärungsversuche	S.6
2.2.1. elektromagnetische Erklärungen	S.6
2.2.2. Materialabhängigkeit	S.14
2.2.3. thermische Erklärungen	S.21
2.2.4. Zusammenfassung	S.25
3. praktische Umsetzung des Effekts	S.27
3.1. Roller Electrical Motor (REM)	S.27
3.2. Kugellagermotor	S.29
4. Entwurf einer Unterrichtseinheit	S.33
4.1. Begründung für Unterrichten des Themas	S.33
4.2. vorausgesetztes Wissen der Schülerinnen und Schüler	S.35
4.3. Planung der Unterrichtseinheit in Form eines Projekts	S.36
4.3.1. Begründung für die Unterrichtsmethode des Projektunterrichts	S.37
4.3.2. Thema der vorangehenden Stunden	S.38
4.3.3. Planung und Ablauf des Projekts	S.40
4.3.3.1. Projektinitiative	S.40
4.3.3.2. Auseinandersetzung mit der Projektinitiative	S.43
4.3.3.3. Entwicklung zum Betätigungsgebiet	S.44
4.3.3.4. verstärkte Aktivitäten im Betätigungsgebiet	S.47
4.3.3.5. Projektabschluss	S.47
4.3.3.6. Fixpunkte	S.48
4.3.3.7. Metainteraktionen	S.49
5. Zusammenfassung und persönliche Stellungnahme	S.50

II. Anhang

III. Literaturverzeichnis

IV. Abbildungsverzeichnis

1. Vorwort

Schülerinnen und Schüler stehen dem Physikunterricht an den Schulen oftmals nicht gerade wohlgesonnen gegenüber. Der Umgang mit physikalischen Phänomenen, welche bekannte Wissenschaftler vor Jahrzehnten bereits entdeckt haben, und der Umgang mit abstrakten Formeln scheint einem Teil der Schülerschaft zumeist unnütz und wenig sinnvoll. Deshalb sollte man ihnen zeigen, dass die Physik und auch andere Naturwissenschaften keineswegs komplett abgeschlossene und allwissende Disziplinen sind. Es existieren nämlich noch immer Fragen, welche von keinem hochrangigen Physiker erklärt werden können. Dies soll den Schülern auch unbedingt vermittelt werden. So empfiehlt es auch der Lehrplan¹.

Das Problem hierbei ist jedoch, dass die meisten dieser ungeklärten naturwissenschaftlichen Probleme in hochkomplexe Themengebiete fallen, die für die Schülerinnen und Schüler nach ihrem ausbildungsstandgemäß vorhandenen Wissensstand kaum nachvollziehbar sind und zusätzlich noch schwer im Unterricht anschaulich darzustellen sind. Dennoch sollte man ihnen solche Phänomene nicht vorenthalten, denn auch wenn das Ziel des Unterrichts natürlich das Verständnis der Physik ist, so soll auch deren Unvollkommenheit bewusst gemacht werden. Dadurch soll vor allem der Forschungsdrang angeregt werden. Doch müssen diese Beispiele sorgfältig von der Lehrkraft ausgewählt werden, um den Unterricht schülergerecht und interessant zu gestalten.

Es gilt also für den naturwissenschaftlichen Unterricht Beispiele zu finden, welche keiner gängigen theoretischen wie praktischen Beschreibung folgen, leicht nachzuvollziehen sind und gleichzeitig ohne großen Aufwand den Schülerinnen und Schülern anschaulich gemacht werden können. In dieser Arbeit soll ein solches Problem für den Physikunterricht dahin gehend untersucht werden, ob es den eben genannten Ansprüchen genügt. Beim hier ausgewählten Phänomen handelt es sich um die Wirkung einer Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne das Anlegen eines äußeren Magnetfeldes. Um dieses ausreichend nachvollziehen zu können, soll zunächst der auftretende Effekt möglichst genau beschrieben werden. Damit dann im Anschluss daran eine didaktische Umsetzung verständlich wird, sollen mehrere Erklärungsversuche aus der Fachwissenschaft auf ihre Gültigkeit geprüft werden. Auf dieser Grundlage wird letztlich eine Unterrichtseinheit zum Phänomen der Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne ein äußeres Magnetfeld geplant.

¹ <https://www.isb.bayern.de/realschule/lehrplan/realschule-r6/fachprofil-ebene-2/physik/804/>

2. Beschreibung des Effekts

2.1. Entdeckung des Effekts

Das physikalische Phänomen, welches hier behandelt wird, wurde zum ersten Mal von dem britischen Physiker John Tyndall (1820-1893) bereits in der Mitte des 19. Jahrhunderts entdeckt². Dieser beobachtete nämlich, dass bei einem seiner Versuche eine hohle, leitende Kugel, die auf zwei parallel laufenden Schienen lag und durch die Strom floß, hin und her zu wackeln begann. Doch dieser Beobachtung wurde scheinbar keine große Bedeutung zugeschrieben, da erst hundert Jahre später dieser Effekt in einer anderen Art und Weise „neu-entdeckt“ wurde und auch daran im Anschluss in der Fachwelt nur geringe Beachtung fand.

Diese „Neu-Entdeckung“ wird R.A. Milroy zugeschrieben, einem Maschinenbauer aus Annapolis, Maryland³. Milroy stieß durch Zufall auf das Phänomen im Dezember 1959, als er ein hydrodynamisches Gyroskop bauen wollte. Der Begriff Gyroskop bezeichnet ein Instrument, das aus einem Kreisel besteht, der sich in drei senkrecht zueinander liegenden Lagern dreht. Das Gyroskop ist nicht nur ein interessantes physikalisches Spielzeug, sondern war als Kreiselinstrument eine überaus wichtige Erfindung, v.a. für die Verkehrstechnik und Navigation⁴. Der Aufbau eines solchen Apparates wird in Abbildung 1 verdeutlicht.



Abb. 1: Aufbau eines Gyroskops⁵

Milroy muss dabei in etwa folgendes passiert sein: Beim Anschließen von Strom an die

² [3] Seite 86

³ [1]

⁴ [30]

⁵ [26]

Achse, auf welcher der Kreisel (aus leitendem Material) angebracht war, fing dieser auf einmal an sich ohne weiteren äußeren Einfluss zu drehen. Es wirkte also auf den Kreisel, der hierbei als Leiter fungierte, eine Kraft. Doch ohne ein äußeres Magnetfeld wäre kein Grund dafür bekannt gewesen, dass sich der Apparat in Rotation versetzt. Ansonsten hätte der Effekt einfach mit Hilfe der Lorentzkraft erschlossen werden können. Doch auch Milroy konnte der Tatsache wohl zunächst keine vernünftige Erklärung zuweisen und stellte daraufhin einen neuen Versuchsaufbau her, der für ihn eine plausible Erklärung geben sollte. Dieser Aufbau sah folgendermaßen aus:

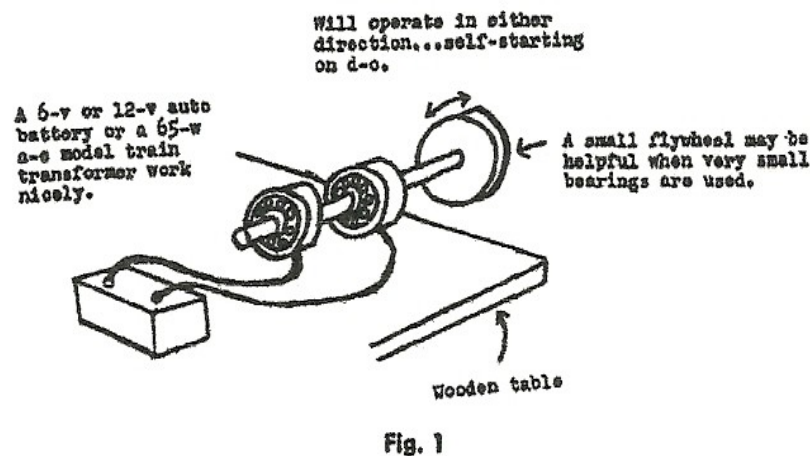


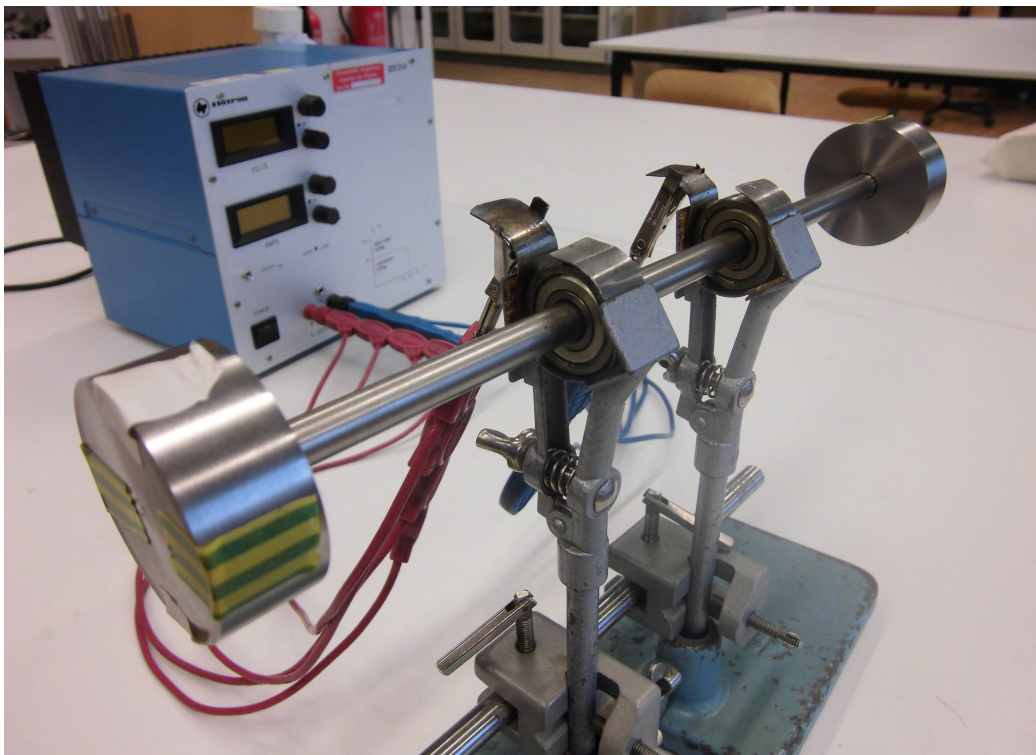
Abb. 2: Versuchsaufbau von Milroy ⁶

In Worten ausgedrückt setzte sich der Versuch also aus folgenden Bestandteilen zusammen: Als Strom- bzw. Spannungsquelle diente ihm eine einfache 6 Volt oder auch 12 Volt Autobatterie, also eine Gleichspannung. Diese wurde an zwei Kugellager angeschlossen, die über eine runde Achse verbunden waren. An deren Ende war zusätzlich noch ein Schwungrad angebracht, um im Falle einer Drehbewegung diese Rotation mit möglichst wenig Reibungsverlust aufrechtzuerhalten. Schloss man dann den Stromkreis, floss ein Gleichstrom in den äußeren Laufring des einen Kugellagers, über die Kugeln und den inneren Laufring auf die Achse. Schließlich konnte der Strom über das andere Kugellager in umgekehrter Richtung wieder abfließen. Dann geschah das, was Milroy bereits bei seinem Gyroskop passiert war: die Achse mitsamt Schwungrad fing an sich zu drehen, sobald der gerade beschriebene Stromkreis geschlossen wurde. Milroy fand bemerkenswert, dass der von ihm gebaute Apparat relativ frei von Reibung zu laufen schien und mithilfe seiner einfachen Batterien bis zu 1000 Umdrehungen pro Minute schaffte. Dies alles klappte bei einem leicht zu konstruierenden Aufbau. Des Weiteren war auffällig, dass zum Hervorrufen des Effekts nur

⁶ [1]

niedrige Spannungen (bei Milroy 6V bzw. 12V), dafür aber starke Ströme nötig waren. Aber erstaunlicherweise war das Auftreten der Drehung unabhängig von der Stromrichtung und auch das Anlegen von Gleich- oder Wechselstrom war nicht ausschlaggebend. Milroy gab zusätzlich noch an, dass sich bis dahin niemand mit einem ähnlichen Versuch ernsthaft auseinandergesetzt habe. Aber er sah ein gewisses technisches Potential darin, auch wenn er die Ursache für die Drehung der Achse in seinem Apparat nicht erklären konnte. Er schrieb über Anwendungsmöglichkeiten dieses Effektes, dass in der Praxis beispielsweise Eisenbahnwaggons eine Beschleunigung erfahren, wenn ein Strom durch deren Räder fließt. Hierzu gibt es Hinweise auf Versuche russischer Forscher, die wohl diese Erkenntnis auf Bahnradständen anwandten⁷. Leider konnten hierzu keine genaueren Angaben ausfindig gemacht werden. Aber man kann daraus schließen, dass es durchaus möglich ist diesen ursprünglichen Versuch Milroys noch weiter auszubauen, zum Beispiel zu einem sog. Kugellagermotor (vgl. Bild). Wie der Kugellagermotor dann unter Betrieb läuft, ist in Video [V1]⁸ zu sehen.

Abb. 3:



Kugellagermotor ⁹

Außerdem kann dieses Phänomen in einem unterschiedlich zusammengesetzten Versuchsaufbau, aber mit gleichem Effekt beobachtet werden: dazu nimmt man zwei Stäbe aus gleichem leitendem Material und am besten gleicher Beschaffenheit (Durchmesser,

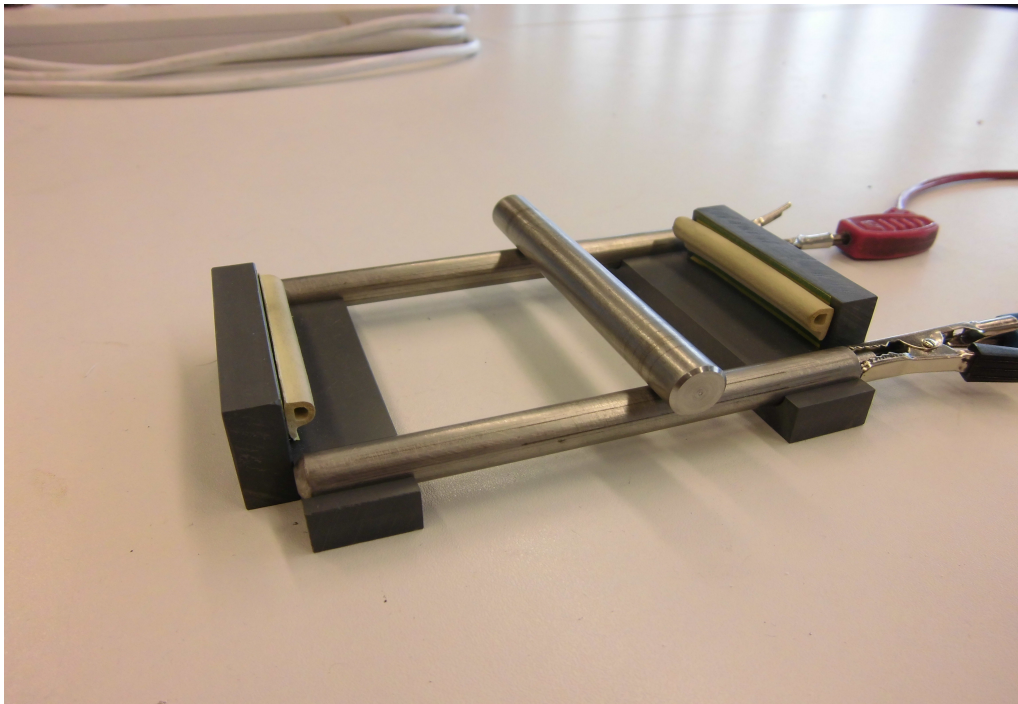
⁷ [18]

⁸ Eigene Aufnahme

⁹ Eigene Aufnahme

Länge) als eine Art Schienen. An jeweils eine der Schienen muss man den Pol einer Spannungsquelle anbringen. Schließt man sodann den Stromkreis, indem auf die Schienen ein rundes Leiterstück lose gelegt wird, so fängt dieses Leiterstück an, sich zu bewegen, ohne dass dafür sofort ein Grund ersichtlich wäre. Das Leiterstück scheint sich aus denselben Gründen zu bewegen, wie sich auch die Achse in Milroys Versuch mit den Kugellagern zu drehen begann. Hier ein beispielhafter Aufbau:

Abb. 4:



Roller

Electrical Motor (REM) ¹⁰

Wer diesen Versuch zuerst durchgeführt hat, ist nicht eindeutig festzustellen. Dennoch wird er im Zusammenhang mit der Diskussion der Kräfte auf stromdurchflossene Leiter und dem Kugellagermotor in der Fachliteratur immer wieder erwähnt und als "Roller Electrical Motor" (REM) bezeichnet. Wie der REM unter Stromfluss schließlich in Betrieb genommen wird, ist in Video [V2]¹¹ zu sehen.

Es scheint jedoch, dass dieses Phänomen nicht ernsthaft von größeren Forschungsgruppen untersucht worden ist, bzw. noch untersucht wird, da bis heute noch keine definitive Aussage über den Grund des Auftretens der Bewegung geliefert wurde. Diese Nicht-Beachtung scheint aber unangebracht, wenn man das Potential - das wohl auch Milroy gesehen hatte - dahinter entdeckt.

Dennoch sind einige interessante Erklärungsversuche zu Kräften und Drehmomenten auf stromdurchflossene Leiter ohne äußere Magnetfelder, also auch zum REM sowie zum Kugellagermotor vorhanden. Im folgenden Abschnitt werden nun einige Ansätze dargelegt

¹⁰ Eigene Aufnahme

¹¹ Eigene Aufnahme

und im Hinblick auf ihre Richtigkeit bzw. Aussagekraft überprüft.

2.2. Erklärungsversuche

Eine handvoll Physiker haben sich bis jetzt an einer theoretischen wie praktischen Erklärung des oben beschriebenen Effekts versucht. Dabei werden unter diesen Fachleuten durchaus verschiedene Meinungen vertreten und bis heute konnte noch keine theoretische Erklärung gefunden werden, die die praktisch erbrachten experimentellen Ergebnisse mit absoluter Gewissheit vorhersagen kann.

2.2.1. Elektromagnetische Erklärungen

Hört man eine Beschreibung des Versuchs oder sieht man ihn zum ersten mal in der Praxis durchgeführt, egal ob in der Form des Kugellagermotors oder des REMs, wird wohl eine elektromagnetische Begründung als sehr nahe liegend eingeschätzt. Der REM erinnert nämlich stark an das klassische Experiment zur Lorentzkraft, nur dass der dafür nötige Hufeisenmagnet fehlt (vgl. Abb. 4). Auch beim Kugellagermotor könnte man auf den ersten Blick über Wirbelströme, die Magnetfelder hervorrufen, o.Ä. argumentieren und so versuchen den Effekt zu begründen.

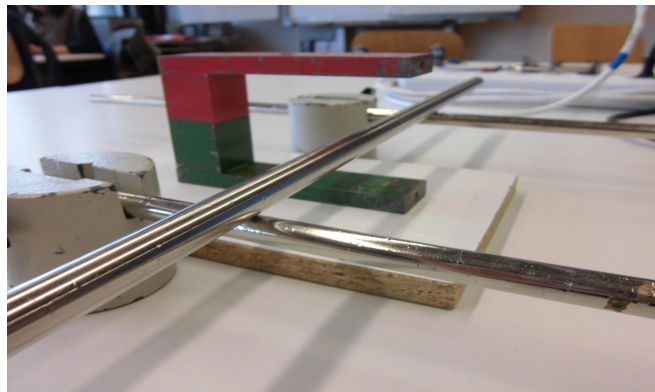


Abb. 5: klassischer Versuchsaufbau zur Lorentzkraft ¹²

Mit einer theoretischen Herangehensweise zur Erklärung der Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne äußeres Magnetfeld auf Basis elektromagnetischer Grundlagen setzten sich vor allem die beiden Physiker P. Hatzikonstantinou und P.G. Moyssides auseinander, ebenso wie H. Gruenberg. Sie versuchten mithilfe der Maxwell-Gleichungen das Phänomen theoretisch zu begründen¹³. Auf eine ausreichende Darlegung dieser mathematischen Ausführungen soll hier nun verzichtet werden, da dies zum Einen den

¹² Eigene Aufnahme

¹³ Vgl. [5] , [9] , [12]

Rahmen dieser Arbeit sprengen würde und zum Anderen im weiteren Hinblick für eine didaktische Diskussion zu diesem Effekt in keiner Weise hilfreich sein würde. Es liegt jedoch eine vereinfachte Ausführung einer möglichen elektromagnetischen Theorie vor, die auch in verständlicher Form durchaus Schülerinnen und Schülern vermittelt werden könnte. Diese liefert K.T. McDonald anhand des Kugellagermotors¹⁴. Er begründet das Auftreten der Drehung der Achse folgendermaßen:

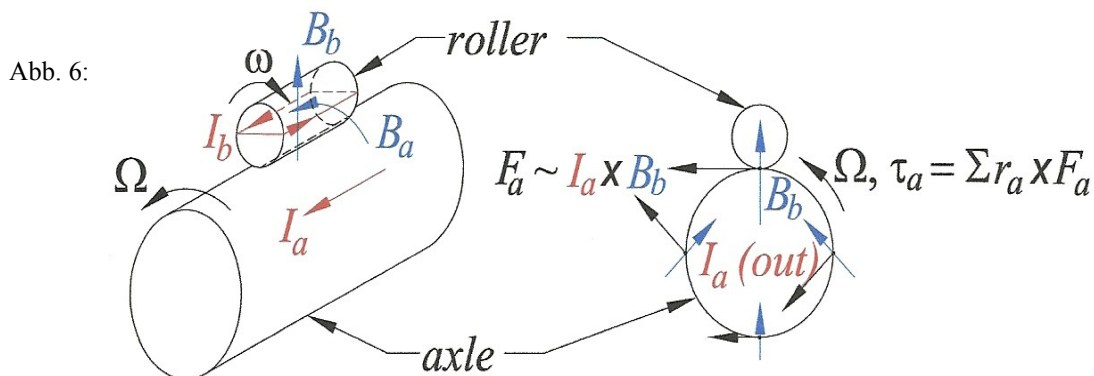
Vorneweg schreibt er zunächst ebenso wie Milroy, dass im Allgemeinen kein Start aus eigenem Antrieb des Kugellagermotors möglich ist. Er benötigt entweder einen anfänglichen Schub oder eine sehr hohe Stromzufuhr. Dann verfährt er mit seiner Erklärung weiter: Der Achse wird die Winkelgeschwindigkeit ω zugeordnet. Ebenso wird den Lagern eine Rotationsgeschwindigkeit Ω gegeben, welche sich dann berechnen lässt zu:

$$\omega = \frac{r_a}{r_b} \Omega \quad (1)$$

Dabei beschreibt r_a den Radius der Achse und r_b den Radius der Lager. Fließt nun ein Strom I_a in der Achse, so ruft dieser nach Oerstedt ein Magnetfeld B_a hervor. Dieses verläuft dann in konzentrischen Kreisen um die Achse des Kugellagermotors. Nun wirkt aufgrund des entstandenen Magnetfeldes auf die Leitungselektronen in den Lagern eine Lorentzkraft F_L , die sich wie folgt errechnen lässt:

$$F_L = v_b \times B_a = (\omega \times r_b) \times B_a \quad (2)$$

Diese Lorentzkraft führt wiederum dazu, dass die Leitungselektronen in den Kugellagern sich zu bewegen beginnen, und diese lösen somit einen Stromfluss I_b aus, der dann in den Lagern "kreist" (vgl. Abb. 5).



Erklärungsversuch McDonald¹⁵

¹⁴ [7]

¹⁵ [7]

Dabei sei erwähnt, dass I_b sich proportional zur elektrischen Leitfähigkeit σ der Lager verhält. Der neu auftretende Strom I_b verursacht dann erneut ein Magnetfeld B_b , welches senkrecht zur Achse im Kugellager verläuft. Daraus resultiert dann nach Lorentz wiederum eine Kraft F_a auf die Achse, die sich proportional zum Strom in der Achse und zum Magnetfeld im Kugellager verhält, also:

$$\rightarrow F_a \propto I_a \times B_b \quad (3)$$

Die Größe der Kraft variiert über die Achse hinweg, ist aber am stärksten beim Kontakt von Achse und Kugellager. $\rightarrow F_a$ löst dann ein Drehmoment τ aus, welches in selber Richtung wie $\rightarrow \omega$ wirkt und sich berechnen lässt zu:

$$\rightarrow \tau = \sum \rightarrow r_a \times \rightarrow F_a \quad (4)$$

Soweit die Idee hinter den elektromagnetischen Erklärungen. Die Theorie liefert dann schließlich eine Formel für das Drehmoment τ , die aber leider in der hier verwendeten Fachliteratur nicht näher begründet wird. Diese lautet:

$$\tau = K_1 \cdot I^2 \cdot \mu_m^2 \cdot \sigma \cdot \omega^{16} \quad (5)$$

Dabei wird den Bestandteilen folgende Bedeutung zugewiesen: ω beschreibt die Winkelgeschwindigkeit des sich drehenden Objekts, σ steht für die elektrische Leitfähigkeit des Materials, μ_m für die magnetische Permeabilität des Leiters und K_1 bezeichnet eine Konstante für den jeweiligen Leiter, die von gewissen Faktoren beeinflusst wird. Nach Watson et al., die sich ebenso mit den Kräften auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfelder beschäftigt haben, hängt diese Konstante K_1 von zwei Größen ab¹⁷. Zum Einen spielt der „effektive“ Durchmesser D des sich bewegenden Leiters eine Rolle und zum Anderen die magnetische Flussdichte, hier bezeichnet mit B_n . Dabei gelten der Theorie nach folgende Beziehungen:

$$K_1 \propto D^3 \quad K_1 \propto f(B_n) \quad (6) \quad (7)$$

Was mit dem effektiven Durchmesser D gemeint ist, zu dessen dritter Potenz die Konstante K_1 der Theorie nach proportional sein müsste, soll folgender schematischer Versuchsaufbau von Watson zeigen:

¹⁶ [3], [4]

¹⁷ [3]

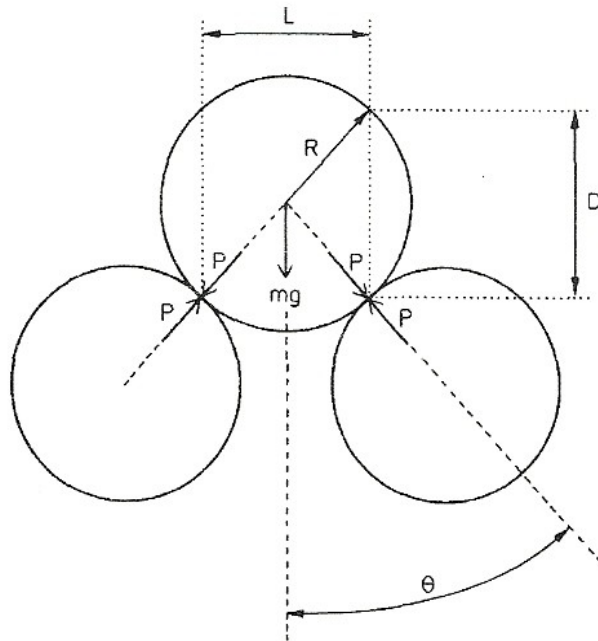


Abb. 7: Watsons Kugel auf Schienen ¹⁸

Mit dem effektiven Durchmesser ist also nicht einfach der gesamte Durchmesser der Kugel gemeint, sondern nur der Bereich bis zu den Kontaktpunkten an den Schienen. Bei Watson wird hier aber der Effekt auf andere, jedoch sehr ähnliche Weise im Vergleich zu oben beschriebenen Versuchen anschaulich gemacht. Dabei liegt eine Kugel aus leitendem Material als Mobil auf zwei Schienen. Bei Stromfluss fängt dann die Kugel an sich fortzubewegen, genau wie die Achse beim Kugellagermotor oder das Leiterstück beim REM. Neben den oben genannten Proportionalitäten gilt zusätzlich, dass sich die magnetische Flussdichte indirekt proportional zum Winkel θ zwischen Kontaktpunkten und der zum Erdmittelpunkt gerichteten Gewichtskraft verhält. Also:

$$B_n \propto \frac{1}{\theta} \cdot (8)$$

Watson et al. machten es sich anhand des oben abgebildeten Versuchs (Abb. 7) zur Aufgabe, zu prüfen, ob die theoretisch gefundenen Formeln und Zusammenhänge mit der Praxis vereinbar sind. Sie kamen dabei zu folgenden Ergebnissen:

Unter gewissen Umständen und unter der Voraussetzung gewisser Annahmen, die leider nicht näher von Watson beschrieben werden, stimmt der theoretisch erwartete Wert des Drehmoments τ mit dem praktisch gemessenen Ergebnis nahezu überein. Aber in den meisten Fällen konnte die Proportionalität $\tau \propto I^2$, die nach Gleichung (5) gelten sollte, nicht bestätigt werden. Vielmehr zeigte sich mehrfach, dass zwischen den beiden Größen eine lineare Proportionalität herrscht, also $\tau \propto I$. Doch dies war nicht der erste Mangel bzw. Fehler der

¹⁸ [3] Seite 83

theoretischen Voraussagen, der gefunden werden konnte.

Erstaunlich war auch, dass der Effekt auch bei nicht magnetischen Materialien wie Messing oder Edelstahl sehr gut funktioniert. Es zeigte sich sogar, dass die Motoren unter Verwendung von Edelstahl am effizientesten laufen¹⁹. Gleichung (5) sagt voraus, dass die magnetische Permeabilität μ_m eine Rolle für das Drehmoment spielen muss, doch scheint dies offenbar nicht der Fall zu sein. Des Weiteren werden in derselben Gleichung, außer dem Durchmesser, keine weiteren Dimensionen des stromdurchflossenen Leiters, wie zum Beispiel seine Masse, berücksichtigt. Aber man kann beobachten, dass die Kraft auf den rollenden Leiter größer wird, wenn beispielsweise der Abstand der Schienen zueinander vergrößert wird. Doch diese Tatsache findet mit der theoretischen Beschreibung noch gar keine Erklärung. Es könnte aber auch damit zusammenhängen, dass zwar durch Vergrößerung des Abstandes der effektive Durchmesser D abnimmt, doch die radiale, mechanische Belastung p zunimmt. Diese drei Größen, lassen sich in Abhängigkeit der Masse m und dem Radius R der Kugel sowie dem Winkel θ folgendermaßen bestimmen.

$$L = 2 \cdot R \cdot \sin \theta \quad (9) \quad D = 2 \cdot R \cdot \cos \theta \quad (10) \quad p = \frac{m \cdot g}{2 \cdot \cos \theta} \quad (11)$$

Bei der experimentellen Überprüfung des Einflusses dieser drei Größen auf die Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld durch Watson et al. stellte sich heraus, dass sich bei Vergrößerung des Winkels θ und Vergrößerung der Masse m der Effekt verstärkt²⁰. Jedoch sagt die Theorie nach Gleichungen (8), (7) und (5) fälschlicherweise genau das Gegenteil voraus.

Zur genaueren Bestimmung des Einflusses der Größen L , D und p wurden von Watson et. al. Experimente mit dem REM durchgeführt.

Zur Bedeutung des Abstandes L wurden drei Messungen mit jeweils unterschiedlichem Schienenabstand, jedoch konstantem Leiter- sowie Schienendurchmesser und konstanter Masse des Leiters durchgeführt. Dabei wurden für unterschiedliche Abstände $a = 35 \text{ mm}$, $b = 50 \text{ mm}$ und $c = 95 \text{ mm}$ folgende Ergebnisse erzielt:

¹⁹ [2] Seite 2179

²⁰ [3]

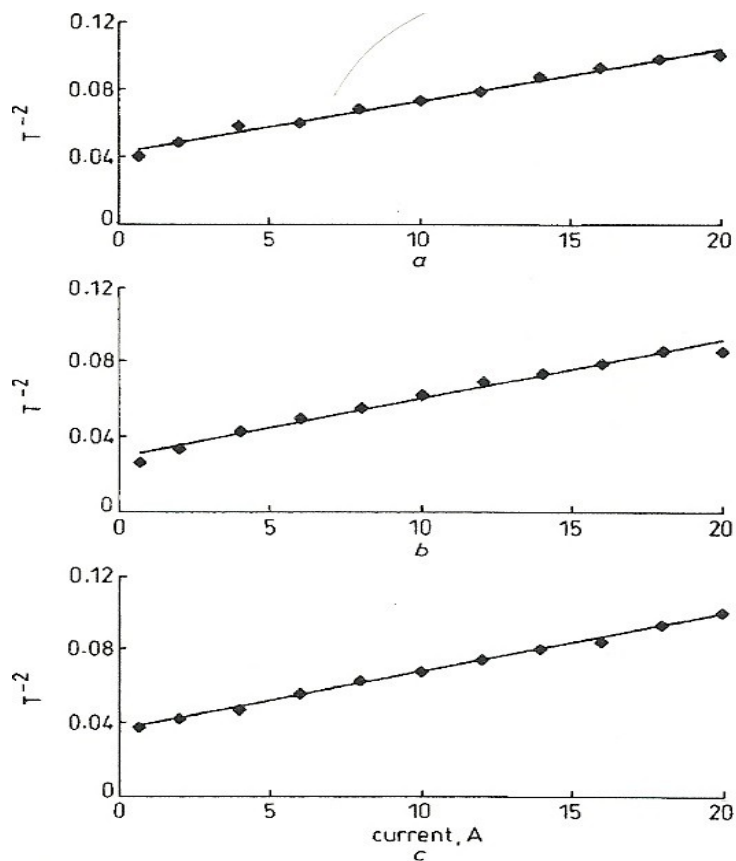


Abb. 8: Versuchsergebnisse bei unterschiedlichem Schienenabstand ²¹

Bei genauer Betrachtung der Graphiken lässt sich aber kein signifikanter Unterschied erkennen, auch wenn der Schienenabstand sogar nahezu verdreifacht wurde. Deshalb muss die Auswirkung des Effekts so gut wie unabhängig vom Schienenabstand l sein.

Bei einem weiteren Versuch wurde dann der Einfluss des Durchmessers d des rollenden Leiters überprüft. Hierbei war besonders wichtig, dessen Masse konstant zu halten. Bei Variation von d ließen sich die folgenden Ergebnisse erzielen:

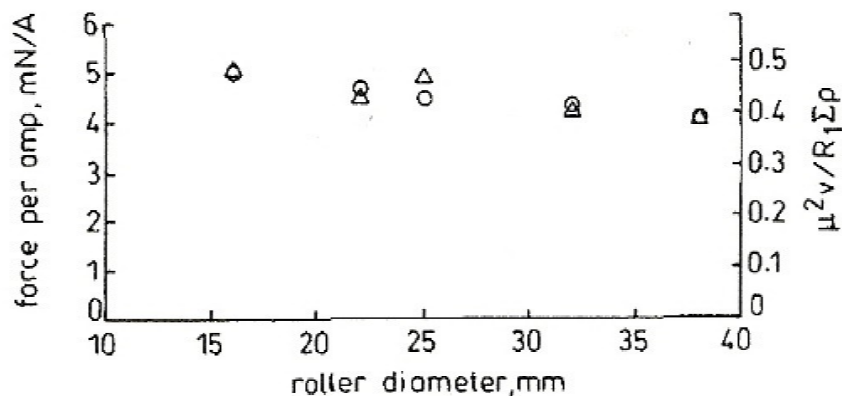


Abb. 9: Versuchsergebnisse bei unterschiedlichem Durchmesser ²²

²¹ [3] Seite 84

²² [3] Seite 85

In dieser Abbildung stehen die Messwerte, die mit Dreiecken eingezeichnet wurden, für die experimentell gefundenen Ergebnisse. Die durch Kreise gekennzeichneten stehen für die theoretisch errechneten Werte. Dabei ist auffällig, dass die theoretisch errechneten Werte sehr nahe bei den experimentell Bestimmten liegen. Außerdem ist die Veränderung der Kraft pro Ampere sehr gering gegenüber der verhältnismäßig großen Variation des Durchmessers. Damit kann gefolgert werden, dass der effektive Durchmesser d nur eine kleine Rolle für die Auswirkungen der Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne Magnetfeld spielt. Demnach muss diese Kraft auf den Leiter eng mit der mechanischen Belastung p zusammenhängen. Zur experimentellen Überprüfung wurden dazu Leiter mit verschiedenen Massen, aber gleichem Durchmesser auf den Schienen, die einen konstanten Abstand zueinander hatten, benutzt. Bei dieser Versuchsanordnung wurden dann erwartungsgemäß signifikante Resultate gewonnen:

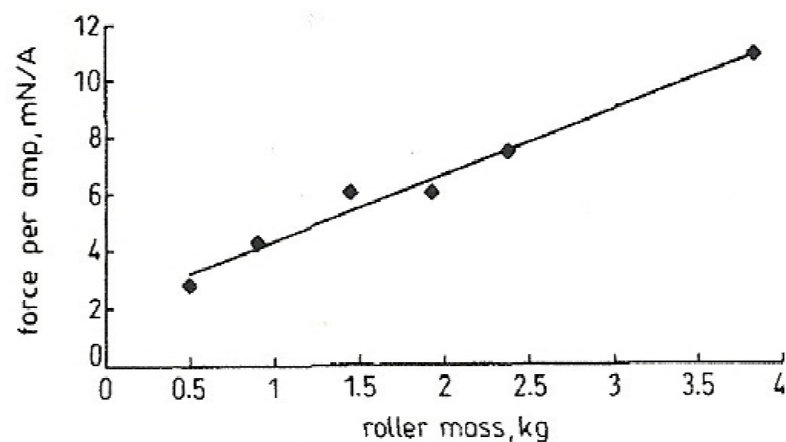


Abb. 10: Versuchsergebnisse bei unterschiedlicher Masse ²³

Die treibende Kraft des hier verwendeten REMs hängt also eindeutig mit der Masse bzw. der mechanischen Belastung p zusammen. Der Graph gibt eine Änderungsrate von 2,3 Millinewton pro Ampere und Kilogramm an. Dies mag zwar nur eine geringe Änderung sein, kann aber für praktische Anwendungen oder eine Weiterführung des Versuchs sehr wohl von großer Bedeutung sein. Man beachte hierbei zusätzlich, dass von Watson et al. „nur“ bis zu 4 Kilogramm schwere Leiterstücke benutzt wurden. Watson führte mit anderen Kollegen zwei Jahre später neue Versuche mit größeren Massen durch und konnte dabei feststellen, dass der REM dazu in der Lage war große Massen (bis zu 220 Kilogramm) mühelos zu transportieren²⁴. Der verwendete Versuchsaufbau ist zudem leicht nachzustellen und zu

²³ [3] Seite 85

²⁴ [4]

veranschaulichen (vgl. hierzu Video [V3]²⁵)

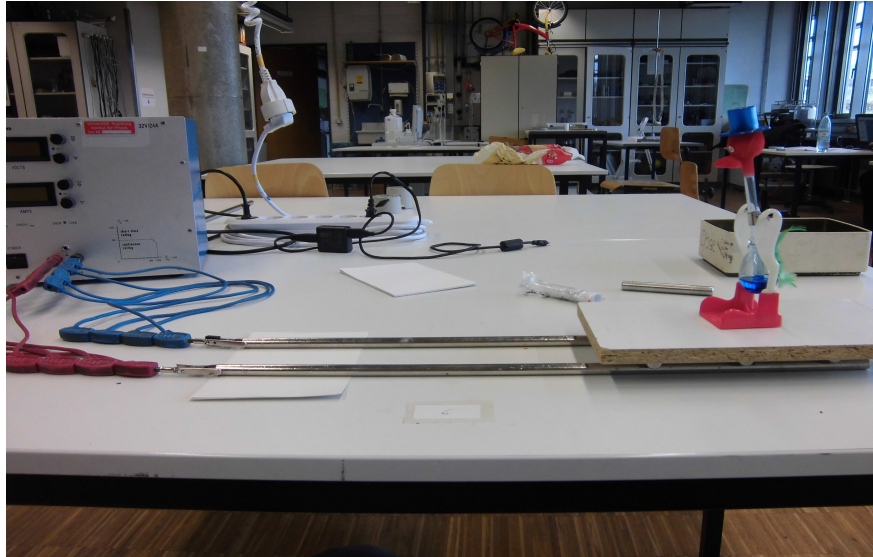
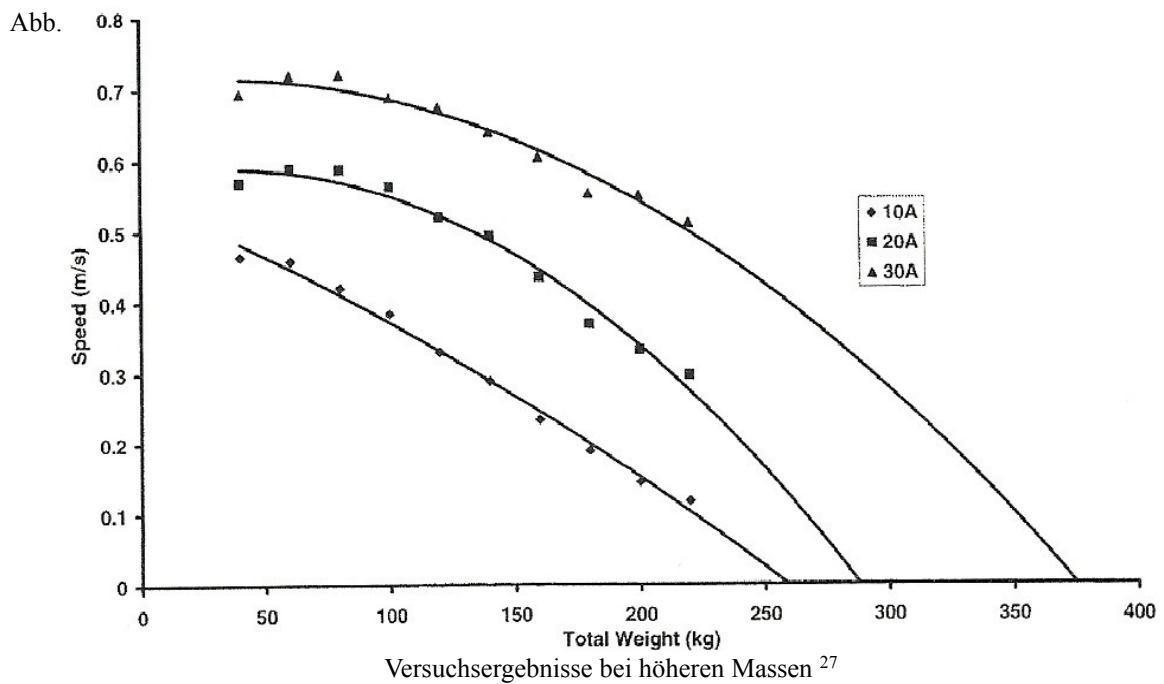


Abb. 11: Belasteter REM ²⁶

Aber der REM kann für gewisse Ströme nur Massen bis zu einer bestimmten Grenze befördern. Diese Grenze kann durch Extrapolation der Messwerte gefunden werden. Watson kam hierbei zu folgenden Resultaten:



Demnach ist es möglich mit dem REM bei nur 30 Ampere eine Last von ca. 370 Kilogramm bei geringer Geschwindigkeit zu befördern.

Über die elektromagnetischen Erklärungsversuche, die tatsächlichen experimentellen

²⁵ Eigene Aufnahme

²⁶ Eigene Aufnahme

²⁷ [4] Seite 743

Ergebnisse und die daraus resultierenden Folgen lässt sich also nun zusammenfassen: Die Kraft auf den stromdurchflossenen Leiter, die Kugellager oder die leitende Kugel ohne äußeres Magnetfeld verhält sich über die größten Bereiche proportional zum Strom I . Also $F \propto I$, wohingegen die Theorie fälschlicherweise eine Proportionalität zum Quadrat des Stromes voraussagt. Ein weiterer Widerspruch zur Deutung des Phänomens mit der Theorie des Elektromagnetismus ist die - wenn auch nur geringe - Abhängigkeit vom Durchmesser D . Die Theorie sagt nach Gleichungen (6) und (5) eine Steigerung des Drehmoments bzw. der Kraft bei größerem Durchmesser voraus, jedoch verhält es sich in der Praxis scheinbar gegenteilig. Zudem verhält es sich mit der mechanischen Belastung ähnlich, da die Theorie voraussagt, die Kraft werde bei zunehmendem p geringer. Jedoch zeigt die Praxis das genaue Gegenteil.

2.2.2. Materialabhängigkeit

Da nun offensichtlich die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne Magnetfeld nicht durch elektromagnetische Theorien begründet werden kann, muss in Folge dessen die Frage gestellt werden, ob der Effekt davon abhängt, welches Material dabei benutzt wird. Ausgiebig damit beschäftigt hat sich erneut D.B. Watson im Jahre 1997²⁸, auf dessen Arbeit sich der folgende Abschnitt stützt. Er wählte zur gewünschten Untersuchung einen Aufbau, der dem des REM sehr ähnelt.

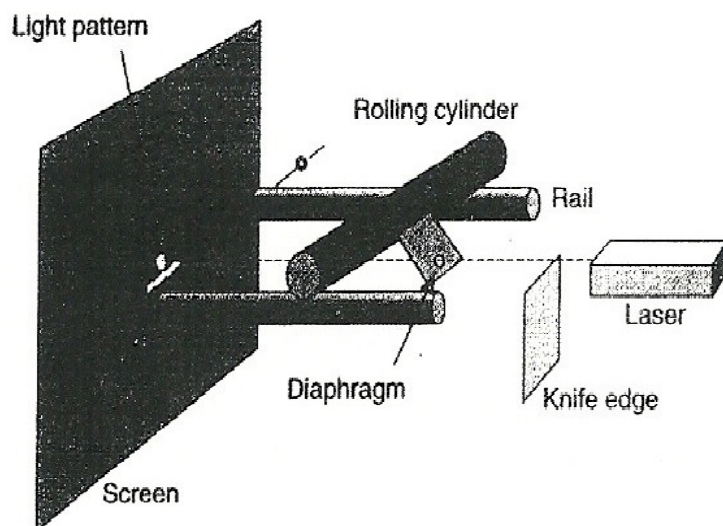


Abb. 13: Versuchsaufbau von Watson zur Untersuchung der Materialien²⁹

²⁸ [2]

²⁹ [2] Seite 2176

Der Versuchsaufbau lässt sich folgendermaßen in Worte fassen:

Es wird in der Mitte des rollenden Leiters eine Membran angebracht, die mit einem kleinen Loch an deren Unterkante versehen wird. Dann wird Laserlicht, welches teilweise von einer Messerschneide unterbrochen wird, durch die Membran auf einem Schirm hinter den rollenden Zylinder und seinen Schienen sichtbar gemacht. Fließt nun Strom durch die Schienen und den Leiter, der als Mobil auf ihnen liegt, so fängt dieser an hin und her zu schwingen. Zu einer vollen Drehung des Leiters kann es nur durch manuelle Drehung oder extrem hohe Ströme kommen. Stellt man den Stromfluss so ein, dass es nur zu einer Schwingung des Mobils kommen kann, können folgende drei Möglichkeiten eintreten, welche in der Abbildung verdeutlicht werden.

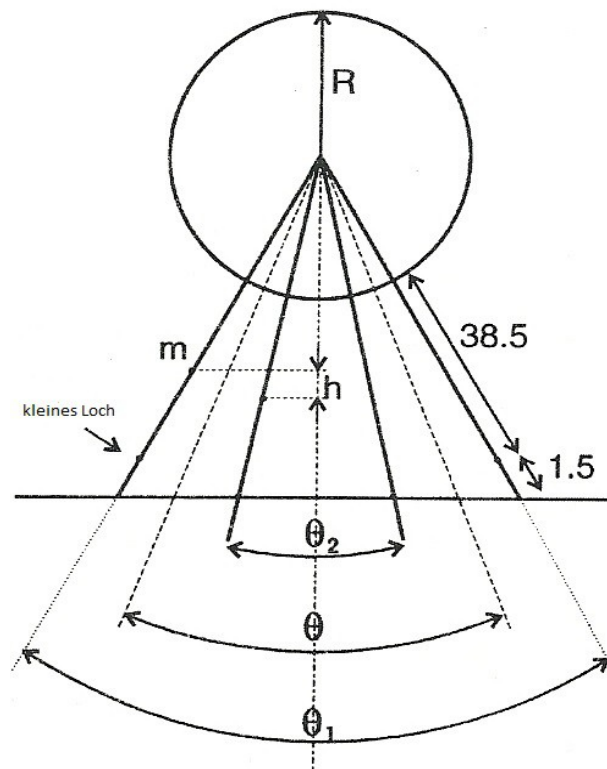


Abb. 14: Veranschaulichung der möglichen Winkeinstellungen ³⁰

Die erste Möglichkeit ist, dass der Auslenkwinkel θ einen gewissen Grenzwinkel θ_1 überschreitet. Dann kann das Laserlicht ungehindert über die Messerschneide hinweg und an der Membran vorbei. Auf dem Schirm werden ein Punkt und eine horizontale Linie sichtbar. Wird der Winkel jedoch kleiner und es gilt schließlich $\theta < \theta_1$, so tritt die zweite Möglichkeit auf und es ist nur ein Punkt auf dem Schirm erkennbar. Ist dann schließlich θ sogar kleiner als θ_2 , so sieht man keinerlei Licht mehr auf dem Schirm.

³⁰ [2] Seite 2176

Startet man also zunächst ohne einen Stromfluss eine solche Schwingung manuell mit einer Auslenkung $\theta > \theta_1$, so erkennt man sowohl Punkt als auch Linie zu Beginn auf dem Schirm.

Nach einer Zeit T_0 ist das Winkelmaß schließlich unter die Grenze θ_2 gefallen und kein Licht ist mehr erkennbar. Schließt man nun aber eine Gleichstromquelle an den Apparat an und startet wieder eine Schwingung des Mobils per Hand, sieht man erst nach längerer Zeit T kein Licht mehr. Wird der Stromfluss noch weiter gesteigert, so wird diese Zeit T immer größer und kann schließlich so eingestellt werden, dass sie bis ins Unendliche anwächst.

Bei genügend hoher Stromzufuhr kann man den Effekt sogar umkehren: der manuelle Start wird so ausgeführt, dass $\theta < \theta_2$ gilt. Somit fällt kein Licht auf den Schirm, doch aufgrund des Stromflusses wird die Schwingung verstärkt und nach einer gewissen Zeit T ist irgendwann der Punkt erkennbar. Daraufhin tritt schließlich der Punkt in Kombination mit der Linie auf.

Will man nun also Versuchsergebnisse graphisch aufzeichnen, so wird dieses „Zeitproblem“ (selbe Zeit T bei abnehmender und wachsender Schwingungsamplitude) gelöst, indem T bei abfallender Amplitude positiv und bei steigender negativ gezählt wird. Zur Analyse und Berechnung der Kraft auf den stromdurchflossenen Leiter wird angenommen, dass das Abfallen der Schwingungsamplitude und dem damit verbundenen Energieverlust durch eine konstante Reibungskraft F_R ausgelöst wird. Für diese gilt, wenn der Leiter N Schwingungen vollführt, folgende Bedingung:

$$F_R = \frac{m \cdot g \cdot h}{2 \cdot N \cdot R \cdot \Theta} \quad (12)$$

Den Variablen werden diese Bedeutungen zugewiesen:

- m die Masse der Membran
- h die Abnahme der Höhe des Schwerpunkts
- R der Radius des rollenden Zylinders
- $\Theta = 0,5 \cdot (\theta_1 + \theta_2)$ der mittleren Auslenkwinkel (vgl. Abb. 14).

Dabei soll erwähnt werden, dass der Schwerpunkt nicht einfach in der Mitte des leitenden Zylinders liegt, sondern leicht versetzt, da ja noch die Membran an den Leiter angebracht ist. Setzt man nun t als Periodendauer und T als die Zeit, die verstreicht, während das Maß des Auslenkwinkels von θ_1 auf θ_2 fällt, so ergibt sich unter Verwendung von $T = t \cdot N$ und Gleichung (12) für die rücktreibende Reibungskraft folgender Ausdruck:

$$F_R = \frac{m \cdot g \cdot h \cdot t}{2 \cdot R \cdot T \cdot \Theta} \quad (13)$$

Das bedeutet:

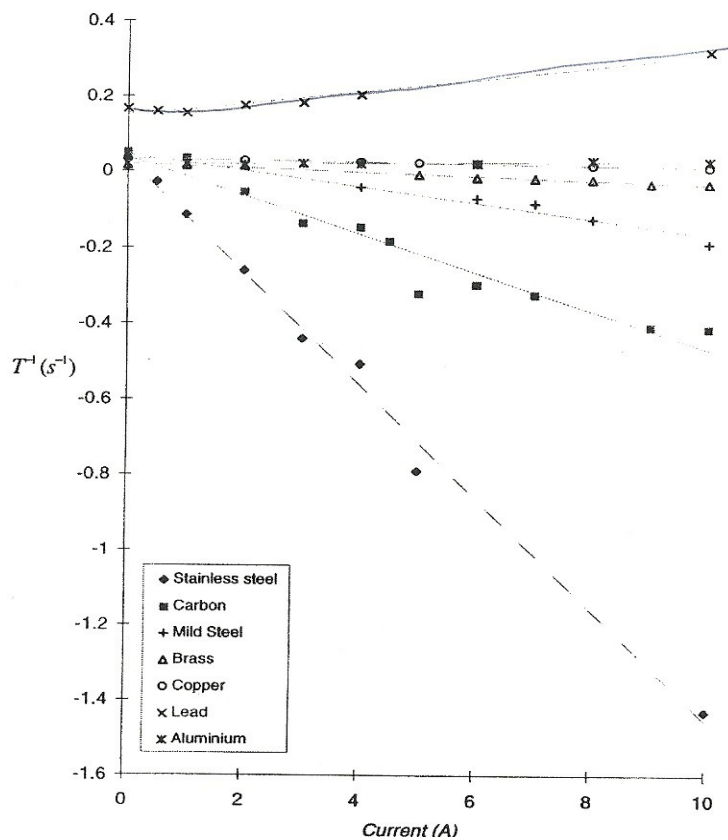
$$F_R \propto \frac{1}{T} \quad (14)$$

Demnach kann die effektive elektrische Zugkraft in Millinewton pro Ampere aus der Steigung der Graphen gewonnen werden, wenn man die Kraft F_R gegen T^{-1} plottet.

In einem Vergleich unter verschiedenen Materialien erhält man somit folgendes Bild:

Abb. 15:

Electrically conducting cylinder on parallel rails



Kraft auf verschiedene Materialien als Leiter ³¹

Dabei sei erwähnt, dass alle rollenden Zylinder die gleichen Dimensionen, sprich Durchmesser und Länge hatten. Die Tatsache, dass die Stäbe jedoch verschiedene Massen hatten, wurde hier leider nicht beachtet. Jedoch bestand kein allzu großer Massenunterschied, da der Durchmesser und die Länge der Leiter mit 12,5 mm bzw. 100 mm klein gehalten wurden. Zudem liegen die Größen der jeweiligen Dichten der interessanten und effizienten Materialien, v.a. der Metalle, nicht besonders weit auseinander. (Stahl: ca. 7,8; Messing: 8,3; Kupfer: 8,9 jeweils Gramm pro Kubikzentimeter)³². Nur Kohlenstoff und Aluminium sind im

³¹ [2] Seite 2177

³² [13] Seite 82

Vergleich zu den anderen Materialien weitaus leichter und Blei vergleichsweise schwerer. Jedoch muss man hierbei erwähnen, dass der Effekt bei Aluminium zu vernachlässigen ist und bei Blei sich der Effekt sogar umkehrt und diesen beiden Stoffen somit keine weitere Beachtung hinsichtlich eines praktischen Nutzens geschenkt werden sollte.

Bei genauer Betrachtung der abgebildeten Resultate lassen sich nun mehrere Dinge ablesen: Zunächst einmal kann man eine Art „Ranking“ unter den Materialien aufstellen. In aufsteigender Reihenfolge der Größe der Kraft auf den jeweiligen Leiter ergibt sich dabei:

- Blei,
- Aluminium
- Kupfer
- Messing
- weicher Stahl
- Kohlenstoff
- Edelstahl.

Für alle Materialien gilt dabei, wie bereits mehrmals erwähnt, dass die Kraft proportional zum Strom zunimmt. Außerdem wurde erstmals gezeigt, dass mit Kohlenstoff das Phänomen nicht nur auf Metalle beschränkt ist. Trotz dessen geringerer Masse ist der Effekt stärker ausgeprägt als bei einem Großteil der verwendeten Metalle. Damit wurde eine eindeutige Materialabhängigkeit für die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne äußeres Magnetfeld bewiesen.

Als nächstes zeigte Watson mit der selben Methode, dass der Effekt auch bei hohlen Leitern funktioniert, und zwar mit folgendem Ergebnis:

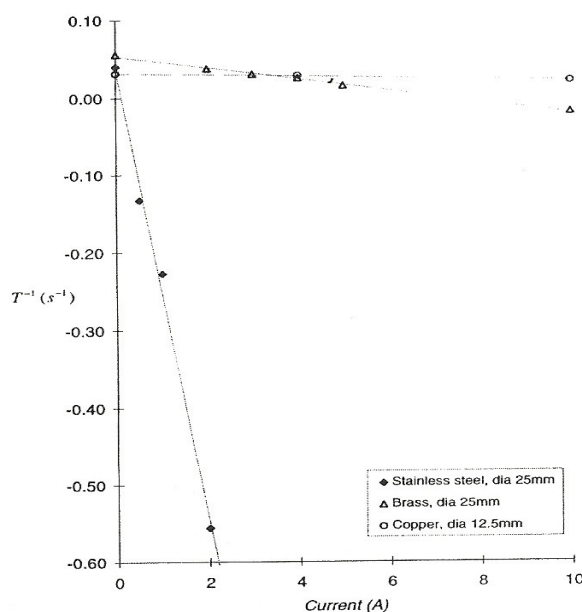


Abb. 16: Kraft auf hohle Leiterstücke ³³

Damit wurde gezeigt, dass die ausgehöhlten Stäbe sich sehr ähnlich zu den massiven Zylindern verhalten. Die geringen Unterschiede bei den Ergebnissen lassen sich einfach durch den Massenunterschied der verwendeten Mobile erklären, da die hohlen Zylinder natürlich leichter sind als die massiven und die mechanische Belastung die Größe des Effekts beeinflusst (vgl. Abschnitt 2.2.1.).

Nun muss noch der Frage nachgegangen werden, welche physikalischen Eigenschaften der Materialien dafür ausschlaggebend sind, wie stark oder schwach der Effekt auftritt. Um aber überhaupt einen Anhaltspunkt zu erhalten, welche Größen der verschiedenen Stoffe dazu verglichen werden müssen, sollte geklärt sein, anhand welcher Teildisziplin der Physik sich diese begründen lassen. Denn offenbar können keine Eigenschaften der Materialien, die den Elektromagnetismus beeinflussen, einen Hinweis auf die Größe der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld geben.

Dazu sollte aber zumindest noch folgendes erwähnt werden: Wie in oberem Abschnitt beschrieben, ist der Effekt bei Edelstahl am deutlichsten und stärksten ausgeprägt. Dabei stellt sich die Frage warum gerade Edelstahl im Vergleich zu normalem oder „weichem“ Stahl, wie er bei Watson genannt wird, so gut funktioniert. Betrachtet man dazu das klassische Nachschlagewerk zum vergleichen von Stählen, den sog. Stahlschlüssel (vgl. Abb. 17 auf der nächsten Seite), fällt eine Sache besonders auf: Die Edelstähle haben alle einen Nickelanteil in sich und sind somit im Vergleich zu anderen Stählen nicht magnetisierbar. Außerdem ist deren Wärmeleitfähigkeit λ mit etwa 15 Watt pro Kelvin und Meter im Vergleich zu ca. 30 Watt pro Kelvin und Meter deutlich geringer. Somit liegt die Vermutung nahe, dass die Stärke des Effekts mit diesen physikalischen Eigenschaften zusammenhängt. Zur Verdeutlichung dient hierbei Abbildung 17.

Dabei trennt die horizontale Linie, die per Hand eingefügt ist, die normalen Stähle oberhalb von den Edelstählen unterhalb dieser Linie.

Aber es muss in jedem Fall eine andere physikalische Theorie als der Elektromagnetismus für die Ausprägung der Kraft auf stromdurchflossene Leiter verantwortlich sein. Welche diese sein kann und welche interessanten Materialeigenschaften sie angibt, wird im folgenden geklärt.

Abb. 17: Stahlschlüssel³⁴

³⁴ [31]

SC

tt

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND			REPUBLIQUE FEDERALE D'ALLEMAGNE			FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY												
Rost- und säurebeständige Stähle			Aciers inoxydables			Stainless steels												
Stoff-Nr. Norme No. Standard No.	Physikalische Eigenschaften Physical properties			Caractéristiques physiques			Schweißbarkeit Weldability			Soudabilité								
	Dichte Density (20°C) kg/dm³	Spezifische Wärme Chaleur spéc. Specific heat (20°C) J g · K	Wärmeleitfähigkeit Conductibilité thermique Heat conduction (20°C) W K · m	Elektrischer Widerstand Résistance électrique Electric resistance (20°C) $\frac{\rho}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ m	Elastizitätsmodul Module d'élasticité Modulus of elasticity (20°C) 10^3 N/mm^2	Magnetisierbar Magnétisable Magnetizable ja oui yes	Magnetisierbar Magnétisable Magnetizable nein non no	Polierbar Polissable Polishable	Bedingt Conditionné Conditional	Schweißverfahren 1) Procédé de soudage Welding method				Vorwärmen Préchauffage Pre-heating ca. °C	Nachbehandlung Traitement ultérieur After-treatment			
										nein non no	2	3	4		5	Glüh- temperatur Recuire to anneal °C	Neu vergüten Traiter à nouveau temper anew	
1.4000	7.7	0.46	30	0.60	216	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	750	-
1.4001	7.7	0.46	30	0.60	216	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	750	-
1.4002	7.7	0.46	30	0.60	216	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	250	•	700	-
1.4005	7.7	0.46	30	0.60	216	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	250	•	700	-
1.4006	7.7	0.46	30	0.60	216	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	250	•	750	-
1.4016	7.7	0.46	25	0.60	220	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	700	-
1.4021	7.7	0.46	30	0.55	216	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	720	(•)
1.4024	7.7	0.46	30	0.55	216	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	720	(•)
1.4034	7.7	0.46	30	0.55	220	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	720	(•)
1.4057	7.7	0.46	25	0.70	216	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	700	-
1.4104	7.7	0.46	25	0.70	216	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	720	(•)
1.4108	7.7	0.46	30	0.55	221	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	720	(•)
1.4109	7.7	0.46	30	0.65	210	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	720	(•)
1.4110	7.7	0.46	30	0.65	210	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	650	(•)
1.4111	7.7	0.46	30	0.65	211	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	650	(•)
1.4112	7.7	0.46	29	0.65	230	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	650	(•)
1.4113	7.7	0.46	25	0.70	216	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	650	(•)
1.4116	7.7	0.46	30	0.55	220	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	650	(•)
1.4117	7.7	0.46	30	0.55	221	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	650	(•)
1.4119	7.7	0.46	30	0.60	207	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	650	(•)
1.4120	7.7	0.46	29	0.55	218	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	650	(•)
1.4122	7.7	0.46	29	0.65	220	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	650	(•)
1.4125	7.7	0.46	29	0.65	230	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	350	•	650	(•)
1.4301	7.9	0.50	15	0.73	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4303	7.9	0.50	15	0.73	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4305	7.9	0.50	15	0.73	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4306	7.9	0.50	15	0.73	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4310	7.9	0.50	15	0.73	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4311	7.9	0.50	15	0.75	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4321	8.0	0.50	17	0.85	196	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4401	7.95	0.50	15	0.75	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4404	7.95	0.50	15	0.75	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4006	7.95	0.50	15	0.75	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4429	7.95	0.50	15	0.75	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4435	7.95	0.50	15	0.75	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4436	7.95	0.50	15	0.75	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4438	8.0	0.50	17	0.85	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4439	7.9	0.50	15	0.85	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4449	7.9	0.50	15	0.85	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4460	7.7	0.50	15	0.75	206	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	750	-
1.4462	7.7	0.50	15	0.79	206	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	750	-
1.4505	7.9	0.50	15	0.85	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4506	7.9	0.50	15	0.85	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4510	7.7	0.46	25	0.60	220	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	750	-
1.4511	7.7	0.46	25	0.60	220	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	750	-
1.4512	7.7	0.46	25	0.60	220	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	750	-
1.4523	7.7	0.46	25	0.70	220	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	750	-
1.4535	7.7	0.46	30	0.65	211	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	750	-
1.4539	8.0	0.50	19	0.80	181	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4541	7.9	0.50	15	0.73	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4543	7.8	0.50	15	0.73	199	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4550	7.9	0.50	15	0.73	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4571	7.95	0.50	15	0.75	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4573	7.9	0.50	15	0.75	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4577	7.9	0.50	15	0.90	196	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4580	7.95	0.50	15	0.75	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4582	7.7	0.50	15	0.75	206	•	-	•	-	-	•	•	•	(•)	200	•	750	-
1.4583	7.9	0.50	15	0.75	200	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4586	7.9	0.50	17	0.85	181	-	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1) Die mit • ohne () markierten Schweißverfahren vorziehen - Les procédés de soudage marqués • sans être entre () sont à préférer
The welding methods marked with • not in () are to be preferred

2) Schutzgas-Schweißverfahren; MIG-Schweißung; WIG-Schweißung (Argon-Arc) - Soudage à l'arc en atmosphère inerte; soudage MIG; soudage WIG (Argon-arc)
Shielded arc welding; MIG-welding; WIG-welding (Argon-arc)

3) Lichtbogen-Schweißung - Soudage à l'arc - Arc welding

4) Widerstandsschweißung - Soudage par résistance - Resistance welding

5) Gasschmelzschweißung oder autogene Schweißung - Soudage autogène - Autogenous welding

264

2.2.3. Thermische Erklärungen

Da elektromagnetische Theorien die Kraft auf einen Leiter, durch den ein Strom fließt, offensichtlich nicht hinreichend gut erklären können, muss ein anderes Modell gesucht werden um eine passende Beschreibung zu liefern. Es scheint sich beim Kugellagermotor bzw. beim REM um ein thermisches Phänomen zu handeln, welches auch mit mechanischen Ursachen zusammenhängt. Diese Vermutung ließe dadurch bestätigen, wenn die Wärmeleitfähigkeit λ für die Größe der Kraft ausschlaggebend wäre.

Diese thermischen Gründe sollen nun im Folgenden erläutert werden. Dabei sollte erwähnt werden, dass bereits Tyndall in der Mitte des 19. Jahrhunderts bei seiner erstmaligen Entdeckung von einer thermischen Begründung ausging (vgl. Abschnitt 2.1.). Er nahm an, dass sich das Material durch Erwärmung ausdehnt und so an den Kontaktpunkten zu lokalen Erhebungen führt, die dann die Kugel vorantreiben³⁵. Aber bis dahin wurde noch keine passende theoretische Analyse zu dieser Vorstellung durchgeführt. Im Folgenden soll nun versucht werden, anhand eines thermischen Modells das Phänomen der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld zu erläutern. Ein Erklärungsversuch wird dazu von Watson et al. folgendermaßen beschrieben³⁶:

Geht man von einer elastischen mechanischen Kraft F_m aus, die auf den beweglichen Leiter wirkt, so lässt sich diese ausdrücken durch:

$$F_m = A \cdot E \cdot \alpha \cdot \theta \quad (15)$$

Dabei stehen die Variablen für die folgenden Größen:

- A beschreibt die Fläche des Bereichs, der durch die ohmsche Wärme erhitzt wird
- E das Elastizitätsmodul des sich dehnenden Materials
- α den Temperatúrausdehnungskoeffizient
- θ die Temperaturerhöhung

Watson et al. schreiben, dass diese Gleichung für den REM außerordentlich realistische Werte liefert, die auch in etwa den experimentell gefundenen Resultaten entsprechen.

Auf Grundlage von Gleichung (15) kann man sogar noch weiter gehen, indem man davon ausgeht, dass die Fläche A davon abhängt, wie groß die Belastung an den Kontaktflächen ist.

Man kann zeigen, dass die Diagonalen a und b der ellipsenförmigen Kontaktflächen von der mechanischen Belastung p abhängen, woraus sich für die treibende Kraft die folgende Formel

³⁵ [3] Seite 86

³⁶ [3] Seite 86 ff

ergibt:

$$F_m \propto E \cdot \alpha \cdot \theta \cdot P \quad (16)$$

mit einer Proportionalitätskonstanten, die vom Radius des Leiters und der spezifischen Krümmung der Schienen und der des Leiters abhängt. Womit also auch notwendigerweise die Dimensionen des Leiters hiermit berücksichtigt werden.

Dabei muss man aber noch beachten, dass bei diesem Modell davon ausgegangen wird, dass in der Kontaktfläche eine Inhomogenität bezüglich der thermischen Ausdehnung herrscht, sich also das Material bei einer Erwärmung nicht symmetrisch in seiner Form ändert. Erst diese unterschiedliche Expansion des Materials treibt den losen Leiter wie auf einer Art „Welle“ an. Dabei wird jedoch noch nicht berücksichtigt, dass diese Kraft bei hohen Geschwindigkeiten geringer wird, da die Dauer des Kontaktes an einer gewissen Stelle abnimmt und sich somit das Material nicht so sehr erhitzen kann. Geht man nun davon aus, dass, wenn der Leiter in Ruhe ist, sich die Kontaktfläche gleichmäßig erhitzt und auch kein Ungleichgewicht in der thermischen Expansion vorliegt, so bleibt dieser in Ruhe.

Also lässt sich folgern, dass bei der Geschwindigkeit Null auch keine treibende Kraft vorliegt. Beginnt der Leiter sich dennoch irgendwann einmal zu bewegen, beispielsweise durch einen äußeren Schub, so steigt die Kraft auf ihn zu Beginn sehr schnell an. Sie erreicht mit wachsender Geschwindigkeit ein gewisses Maximum bei einer kritischen Geschwindigkeit und fällt nach deren Überschreitung wieder ab. Dies lässt sich für konstanten Strom und gleicher mechanischer Belastung schematisch so darstellen:

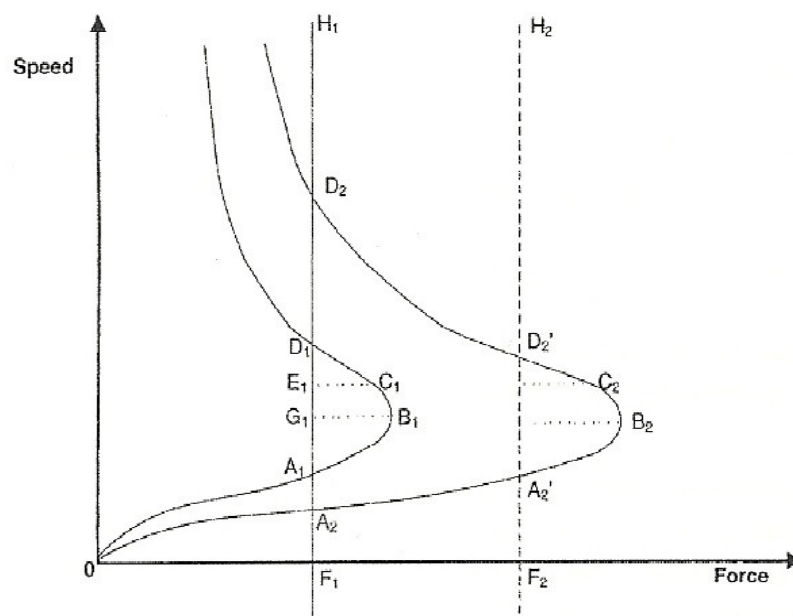


Abb. 18: Kraft auf den Leiter gegen dessen Geschwindigkeit ³⁷

Die beiden Kurven stehen für die Verwendung unterschiedlicher Ströme. In dieser Abbildung wird ersichtlich, dass die Kraft, wie beschrieben, zu Beginn des Rollvorgangs auf den REM sehr schnell anwächst. Bei einer gewissen Geschwindigkeit wird ein Maximalwert erreicht, der dann aber bei zunehmender Geschwindigkeit wieder abnimmt, da die Kontaktdauer geringer wird.

Alle thermisch begründeten Untersuchungen zur Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld liefern also Ergebnisse, die sich auch mit deren Theorie vereinbaren lassen. Also kann man stark davon ausgehen, dass auch die Materialeigenschaften der Stoffe, die in Abschnitt 2.2.2. von Watson et al. untersucht worden sind, thermischen Ursprungs sind.

Dazu gehören nach Gleichung (16) das Elastizitätsmodul E sowie der Temperatúrausdehnungskoeffizient α . Neben diesen Größen können sowohl noch die spezifische Wärme c , als auch die Wärmeleitfähigkeit λ als physikalische Eigenschaften gefunden werden, die mit der Thermodynamik zusammenhängen und für die Ausprägung des Effekts verantwortlich sein können.

Nun sollen die Materialien aus 2.2.2. hinsichtlich dieser vier Größen verglichen werden: Auf die Werte von weichem Stahl, der zwar in 2.2.2. aufgeführt ist, wird jedoch verzichtet, da nicht ersichtlich ist, was damit genau gemeint ist. Damit ist die Suche nach den erforderlichen Daten leider nicht möglich.

Zur Erinnerung hier noch einmal die Reihenfolge der Materialien hinsichtlich ihrer Größe des Einflusses auf die Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld, beginnend mit dem „besten“: Edelstahl, Kohlenstoff, Messing, Kupfer, Aluminium, Blei.

Für diese Stoffe lassen sich folgende Werte für die vier interessanten physikalischen Größen finden:

	Elastizitätsmodul E in $\frac{kp}{mm^2}$	Wärmeausdehnungskoeffizient α in $\frac{10^{-6}}{K}$	Spezifische Wärmekapazität c in $\frac{J}{kg \cdot K}$	Wärmeleitfähigkeit λ in $\frac{W}{m \cdot K}$
Edelstahl	22000	16	500	14
Kohlenstoff	2700	2	715	168
Messing	9000	19	376	113
Kupfer	12500	16,2	385	380
Aluminium	6750	23,8	896	200
Blei	1600	28,3	131	35

Alle Angaben der Tabelle aus [27], [28], [29]

Nun gilt es diese Werte bezüglich der Stärke des Effekts beim jeweiligen Material zu interpretieren. Leider ist hierbei kein eindeutiger Trend auf den ersten Blick zu erkennen, der darauf schließen lassen könnte, dass eine der hier aufgeführten physikalischen Eigenschaften ausschlaggebender sein könnte als eine andere. Es scheint vielmehr eine Kombination aus allen Größen zu sein, die dann eine Aussage über die Effizienz des Materials zulassen würde. Dennoch lassen sich gewisse Punkte finden, die möglicherweise für die Größe der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld verantwortlich sind.

Auffällig ist nämlich, dass das Elastizitätsmodul des Edelstahls mit großem Abstand das der anderen Stoffe überragt, was also die Abhängigkeit der Kraft von dieser physikalischen Eigenschaft bestätigt. Auch dass dieselbe Größe bei Blei eindeutig am geringsten ausgeprägt ist und sich bei Blei, wie bereits oben beschrieben (vgl. Abschnitt 2.2.2.), der Effekt umkehrt, verstärkt diese Vermutung. Jedoch lässt sich bezüglich des Elastizitätsmoduls bei den anderen vier Materialien keine eindeutige Aussage treffen. Dabei müssen dann die anderen hier aufgeführten physikalischen Eigenschaften der Stoffe ausschlaggebend sein. Diese drei anderen Größen, nämlich Wärmeausdehnungskoeffizient α , spezifische Wärme c und die Wärmeleitfähigkeit λ , sind wohl auf mikroskopischer Ebene miteinander gekoppelt. Diese Kopplung muss dann für die Stärke der Kraft des jeweiligen Materials verantwortlich sein, da keine dieser Eigenschaften alleine auszureichen scheint. Doch an dieser Stelle soll nun nicht genauer auf die Kopplung dieser Größen eingegangen werden, da es sich hierbei bis jetzt nur um eine Vermutung handelt, dass sie für den Effekt eine Rolle spielt. Deshalb soll es dabei belassen werden, zwar zu wissen, dass die Kopplung vorhanden ist und dass sie wohl einen Einfluss auf die Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld besitzen könnte, aber keine endgültige Aussagekraft hat.

Abschließend bleibt bei den thermischen Begründungen ein weiteres Phänomen zu klären, welches nun im Folgenden beschrieben werden soll:

Beim Einschalten des REM in einen Stromkreis fängt dieser bekanntlich zu arbeiten an. Sprich das lose Leiterstück fängt an sich zu bewegen (vgl. Video [V2]³⁸). Doch dabei fällt eine interessante Tatsache auf. Rolllt nämlich der Leiter hin und her, während ein Strom durch ihn fließt, so wird ein Geräusch hörbar, welches offensichtlich mit dem auftretenden Effekt zusammenhängt. Denn rollt man den Zylinder nur manuell auf den Schienen hin und her, so bleibt das Geräusch aus. Dies wird in Video [V5]³⁹ ersichtlich. Darin erkennt man, dass eine Art Rauschen auftritt, sobald der Stromkreis durch Kontakt des Kabels mit der Batterie

³⁸ Eigene Aufnahme

³⁹ Eigene Aufnahme

geschlossen wird. Wird dann der Kreis aber immer wieder unterbrochen, rollt zwar das Mobil während der Unterbrechung weiter, jedoch ist das Geräusch nicht mehr zu hören. Diese Erscheinung lässt sich mit einer thermischen Erklärung in etwa folgendermaßen, wie es auch bei Watson vermutet wird, begründen:

Bei Stromfluss erwärmen sich sowohl Leiterstück, als auch Schienen durch die ohmsche Wärme. Dies lässt sich auch leicht bei der Durchführung des Experiments nachvollziehen, da bei längerer Laufzeit ein verbrannter Geruch auftritt. Bei dieser Erwärmung kommt es zur Ausdehnung der Materialien an den Kontaktflächen und das lose Leiterstück beginnt zu rollen durch die so entstandenen Erhebung in der Oberfläche.

Da es kein regelmäßiger Ton ist und das Geräusch auch nicht auftritt, sobald kein Strom fließt, kann der Grund für das Rauschen das eben beschriebene Abrollen des Mobils sein. Somit spricht auch das Auftreten dieses Geräusches für eine thermische Erklärung, außer es lässt sich auf andere Weise plausibler ergründen. Dabei muss auch erwähnt werden, dass der hier beschriebene Grund für das Geräusch nur eine denkbare Möglichkeit ist und keineswegs eine erwiesene Argumentation. Dennoch lässt es sich einfach und realistisch durch thermische Begründungen erklären und es bekräftigt damit die starke Vermutung, dass es sich um eine thermische Erklärung handelt.

2.2.4. Zusammenfassung

Nun lassen sich in Anbetracht der ausgeführten Erklärungsversuche folgende Schlüsse ziehen:

Zum Einen lässt sich der Effekt nicht durch elektromagnetische Theorien erklären, welche man aber vielleicht zunächst vermuten würde⁴⁰. Dahingegen sagt ein thermisches Modell erfolgreich die Größenordnung der Kraft voraus und beschreibt erfolgreich den Einfluss der mechanischen Belastung p und berücksichtigt auch die Dimensionen des Leiters und der Schienen, was dringend erforderlich ist. Somit spricht viel für eine thermische Beschreibung. Die thermischen Mechanismen dominieren zwar im Bereich der durchgeführten Experimente, jedoch können für sehr hohe aber auch für sehr niedrige Ströme andere Faktoren eine Rolle spielen⁴¹.

Will man aus dem Effekt letztlich einen praktischen Nutzen ziehen, so muss doch dazu ein ausgereifteres, theoretisches Verständnis vorhanden sein. Des Weiteren lässt sich sagen, dass

⁴⁰ [5], [7], [9], [12]

⁴¹ [3]

der Effekt interessanterweise sowohl für hohles, als auch für festes Material in gleicher Weise funktioniert⁴². Außerdem muss das angewandte Material vor allen Dingen leitend sein, aber nicht notwendigerweise metallisch. Zusätzlich spielt die magnetische Permeabilität μ_m keine Rolle, dafür aber andere Eigenschaften wie das Elastizitätsmodul, der Temperatúrausdehnungskoeffizient⁴³, die spezifische Wärme und die Wärmeleitfähigkeit. Die Abhängigkeit der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld von den eben genannten physikalischen Eigenschaften ist bis heute noch nicht definitiv geklärt.

⁴² [2]

⁴³ [3]

3. Praktische Umsetzung des Effekts

Der Effekt der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld kann zur prinzipiellen Veranschaulichung, vor allem in der Form des REM, mit relativ einfachen Mitteln verdeutlicht und nachgeahmt werden.

Dazu sind nur eine Batterie, zwei Kabel, zwei Metallstücke, die als Schienen fungieren, sowie ein weiteres Metallstück als mobiler Leiter notwendig (vgl. Video [V2]). Wie die beiden Motoren (REM und Kugellagermotor) in der Praxis Anwendung finden könnten, wird nun in den folgenden Abschnitten besprochen.

3.1. Roller Electrical Motor (REM)

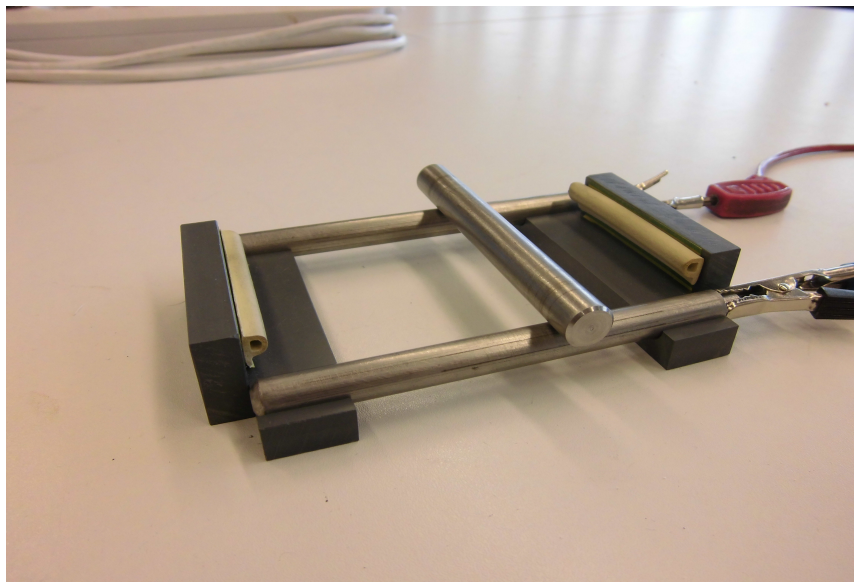


Abb. 19: REM⁴⁴

Betrachtet man noch einmal Abb. 18 (siehe 2.2.3), so beobachtet man das Verhältnis der Kraft im Bezug auf die Geschwindigkeit des REM. Dabei repräsentieren die beiden Kurven das Verhalten des Rollers für spezielle Ströme, wobei der Strom bei der linken Kurve geringer ist, als bei der Rechten.

Denn wie die Erklärungen gezeigt haben gilt $F \propto I$. Aber gleichzeitig gilt, dass $F \propto P$, weshalb die rechte Kurve in Abb. 18 auch einfach durch eine höhere Belastung bei gleichem Strom zustande kommen kann.

Daraus lässt sich folgern, dass der REM dazu in der Lage ist, große Lasten bei geringen Geschwindigkeiten und zugleich niedrigen Strömen zu transportieren. Steigert man nun noch den Stromfluss des Apparates, so können auch etwas größere Geschwindigkeiten erzielt

⁴⁴ Eigene Aufnahme

werden. Nach Watson et al. und Abb. 12 kann aber je nach Größe des Stroms nur eine gewisse Maximallast befördert werden⁴⁵. Der REM kann also somit als Lastentransporter dienen. Wie dies in vereinfachter Form aussehen kann, ist in Video [V3]⁴⁶ zu sehen.

Um diese Möglichkeit tatsächlich in der Praxis umsetzen zu können, müssen noch diverse Verbesserungen an diesem Apparat vollzogen werden. Darunter fallen unter anderem die folgenden Dinge⁴⁷:

Das Nutzen von Materialien, die sehr hart sind, ist beispielsweise von Vorteil. Denn damit genügt bereits eine kleine Erhebung an der Oberfläche, um den Motor in Gang zu setzen. Außerdem wäre ein Material, das nur kleine Wärmemengen zu einer größeren thermischen Ausdehnung benötigt, zu einer Effizienzsteigerung von Vorteil. Dabei besteht jedoch das Problem, dass härtere Festkörper normalerweise einen kleineren Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen. Also muss man zwischen diesen beiden Punkten das optimale Material finden, welches sich sowohl leicht bei Hitze ausdehnt, als auch sehr hart ist.

Außerdem muss die Masse je nach Aufbau sinnvoll gewählt werden, da eine Erhöhung der mechanischen Belastung zwar die Kraft auf den Leiter steigert, aber gleichzeitig eine größere Trägheit mit sich bringt.

Somit lässt sich folgern, dass der REM unter gewissen Umständen ein gewisses Potential für praktische Anwendungen birgt und daher sollte ihm mehr Beachtung geschenkt werden.

⁴⁵ [4]

⁴⁶ Eigene Aufnahme

⁴⁷ [10]

3.2. Kugellagermotor

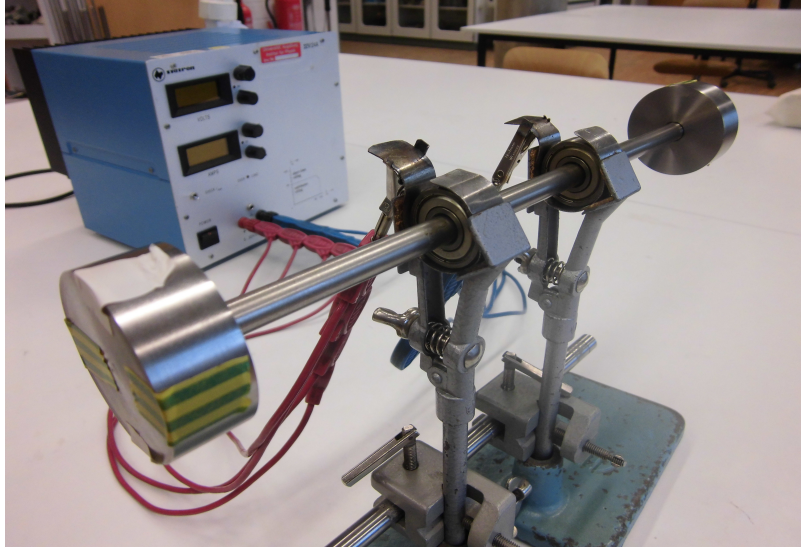


Abb. 20: Kugellagermotor⁴⁸

Ähnlich wie beim REM kann auch der Kugellagermotor durchaus praktische Anwendung finden.

Wie bereits zu Beginn in Abschnitt 2.1. kurz angedeutet, ist es möglich Eisenbahnwaggons, die im Prinzip aufgebaut sind wie der entsprechende Motor, zu beschleunigen, indem man Strom durch die Räder fließen lässt. Leider finden sich hierzu keine genaueren Ausführungen oder weiterführende Versuche⁴⁹.

Doch beim Kugellagermotor lässt sich eine weitere, vielleicht etwas überraschende Hypothese diskutieren.

Diese Diskussion ausgelöst bzw. ausgeführt hat der bulgarische Physiker Stefan Marinow (1931-1997) in einem wissenschaftlichen Aufsatz im Jahre 1989⁵⁰. Seine Behauptung darin ist es, der Kugellagermotor sei ein Perpetuum mobile zweiter Art.

Dazu sei zuerst einmal erwähnt, dass Marinow ebenso die Meinung vertritt, die Kraft, die auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne Magnetfeld wirkt, sei thermischen Ursprungs. Dies gilt wohl auch im allgemeinen Fall wie oben bereits erläutert. Daher hält er die Maschine auch für einen thermischen Motor, der sich im Gegensatz zu konventionellen thermischen Motoren in einigen Weisen bedeutsam unterscheidet. Solche herkömmlichen Motoren werden angetrieben, indem sich Stoffe/Materialien ausdehnen und so einen mechanischen Vorgang in Gang setzen. Das expandierende Medium ist jedoch dabei immer gasförmig. Der entscheidende Unterschied zum Kugellagermotor ist offensichtlich der, dass dieser durch Ausdehnung von Festkörpern (im Idealfall Edelstahl) funktioniert.

Ein weiterer wichtiger Unterschied ist der, dass bei konventionellen Wärmemotoren die

⁴⁸ Eigene Aufnahme

⁴⁹ [1]

⁵⁰ [10]

Bewegungsrichtung des gewonnenen mechanischen Vorgangs immer dieselbe ist wie die Ausbreitungsrichtung des Gases bzw. der aufgeheizten Substanz. Beim Kugellagermotor jedoch verläuft die Bewegung der Achse mit den Schwungrädern im rechten Winkel zur Ausdehnung des Materials der Kugellager.

Außerdem ist es bei den herkömmlichen thermischen Motoren so, dass die kinetische Energie, die beim Expandieren des Stoffes gewonnen wird, genau so groß ist wie der Wärmeverlust des jeweiligen Gases. Dies ist beim Kugellagermotor nicht der Fall, da sich nur ein winziger Teil des Kugellagers dehnt, nämlich der, der in Kontakt zur Achse steht. An diesem Kontaktpunkt, ist dann der ohmsche Widerstand weitaus größer, als im restlichen Kugellager und es kommt so zur Erwärmung und Expansion des Materials. Zudem ist diese Ausdehnung sehr gering (Marinows Annahme: wenige Mikrometer). Aber da die Lager und die Laufringe im Idealfall aus sehr hartem Stahl sind, genügt nur eine kleine Ausdehnung, die jedoch ein großes Drehmoment hervorruft.

Marinow schreibt weiter (wie Watson), dass zum Start der Bewegung in den meisten Fällen ein kleiner Schub nötig ist. Diese Starthilfe kann aber gelegentlich entfallen, da die Oberfläche der Laufringe nicht perfekt glatt ist, wohingegen bei optimaler Glattheit und geometrischer Perfektion ein eigenständiger Beginn unmöglich ist. Fängt dann der Motor an zu arbeiten, so wird die Wärme, die an den Kontaktflächen entsteht, vom inneren Laufring über die Lager zum äußeren Ring geleitet. Diese lokale Überhitzung wird dann vom Lager absorbiert und der sich ausdehnende Bereich wird schließlich so groß wie das gesamte Kugellager selbst. Somit beginnt sich die Achse mitsamt Schwungrädern zu drehen.

Durch diese Rotation wird der Durchmesser des Kontaktpunkts dann sogar größer als das Lager selbst und es tritt ein neues Drehmoment auf. Eine Art „Welle“ wird ausgelöst und die Drehung wird dadurch weiter angetrieben. Als Ergebnis der mechanischen Bewegung kühlt das Kugellager - im Gegensatz zum Gas beim herkömmlichen thermischen Motor - jedoch nicht komplett ab. Diese Wärme wird zwar nicht in kinetische Energie umgewandelt, aber sie bleibt im Metall erhalten und erwärmt dieses zusätzlich.

Dies sind schon einmal die Besonderheiten des Kugellagermotors, die eine weitere technische Beschäftigung damit durchaus rechtfertigen.

Nun aber zur Hypothese, dass es sich um ein Perpetuum mobile zweiter Art handeln könnte: Die Idee dahinter besteht darin, dass der Apparat aus der Umgebungswärme Energie gewinnt. Somit wird die durch Abkühlung erzielte Wärme vollständig in mechanische Arbeit umgewandelt. Ein Perpetuum mobile zweiter Art erhält seinen Namen also daher, dass es den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik verletzt⁵¹.

⁵¹ [21]

Dieser lautet nach dem britischen Physiker Lord Kelvin (1824-1907) folgendermaßen: "Es ist unmöglich, eine zyklisch arbeitende Maschine zu konstruieren, die keinen anderen Effekt hat, als die Entnahme von Wärme aus einem Behälter und die Verrichtung eines gleichen Betrages an Arbeit."⁵². Doch genau dies würde nach Marinow beim Kugellagermotor passieren. Er argumentiert dabei folgendermaßen:

Nimmt man an, der ohmsche Widerstand zwischen Laufringen und Kugellagern ist in Rotation und in Ruhe der gleiche, so ist die produzierte und gespeicherte Wärme in Bewegung und Stillstand ebenso gleich groß. In der Realität ist dies nicht exakt der Fall, da der Widerstand bei Rotation zunimmt. Aber im Vergleich zum Anstieg der Geschwindigkeit der Drehung ist die Zunahme des Widerstandes so gering, dass dies somit näherungsweise vernachlässigt werden kann.

Marinow wollte nun nachweisen, dass der Motor in Ruhe wie in Rotation dieselbe Wärmemenge produziert. Die Idee dahinter war die folgende:

Über eine gewisse Zeitspanne wurde bei einer angelegten Spannung U und einem Stromfluss I der Temperaturanstieg gemessen. Der Widerstand im Motor lässt sich einfach zu $R=U/I$ errechnen. Nun wurde der Motor in Bewegung gesetzt und eine Spannung U' angelegt, und zwar so, dass die gleiche Leistung erbracht wurde wie im stationären Fall. Also muss gelten: $U \cdot I = U' \cdot I'$ mit I' als Stromfluss im sich bewegendem Motor. Nun müsste nach dem Energieerhaltungssatz der Temperaturanstieg derselbe sein, wie im ruhenden Motor, da die gleiche Energiemenge eingespeist wurde. Jedoch war im rotierenden Fall der Temperaturanstieg wider Erwarten höher! Marinow folgerte daraus, dass wegen der konstanten ohmschen Wärme die Unterschiede in der Temperaturerhöhung durch die Reibung in den Kugellagern entstanden sei.

Das erstaunliche dabei war jedoch, dass der Temperaturanstieg zu 8% festgehalten wurde, während die gewonnene mechanische Energie 10% des Inputs der elektrischen Energie betrug. Schließt man nun bei diesem Versuch elektromagnetische Phänomene aus, so wird ein Teil der mechanischen Energie also aus dem „Nichts“ gewonnen, was im dramatischen Widerspruch zum zweiten Hauptsatz der Thermodynamik steht.

Marinow meint hierzu noch, dass elektromagnetische Erklärungen aus dem einfachen Grund auszuschließen seien, da der Motor sowohl nach rechts als auch nach links rotieren kann, obwohl mit Gleichstrom gearbeitet wurde und dieser nur in eine Richtung fließt. Dies kann leicht selbst überprüft werden, siehe dazu Video [V5]⁵³. Selbst bei Wechselstrom war dies der Fall.

⁵² [22]

⁵³ Eigene Aufnahme

Man kann nun sogar noch den Kugellagermotor in seiner Effizienz verbessern, indem man zum Beispiel härteres Material verwendet, welches sich zusätzlich noch bei geringerer Wärmemenge stärker ausdehnt oder Ähnliches (vgl. oben, Abschnitt 3.1.).

Nun stellt sich natürlich die Frage, ob dieser Apparat wirklich ein Perpetuum mobile zweiter Art darstellt, da die gefundenen Ergebnisse Marinows noch einer genaueren Überprüfung Stand halten sollten. Aber auf alle Fälle sind es die beschriebenen Tatsachen und die von Marinow erreichten Resultate wert, näher auf sie einzugehen.

4. Entwurf einer Unterrichtseinheit

Auf Grundlage oben beschriebener Ausführungen, nämlich den Erklärungsversuchen sowie den möglichen praktischen Anwendungen, zur Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne Magnetfeld soll nun eine Möglichkeit gezeigt werden dieses interessante physikalische Phänomen in den Schulunterricht einzubauen. Anhand des oben diskutierten Effekts lassen sich mehrere Themen, die für den Physikunterricht relevant sind, zusammen mit den Schülerinnen und Schülern (im Folgenden nur noch als „S und S“ abgekürzt) behandeln. Im Folgenden wird dies für eine Realschulklasse für die 9. Jahrgangsstufe genauer betrachtet werden. Dabei wird aber nicht zwischen mathematisch orientierten (Ier-) Zweig und den anderen (IIer- bzw. IIIer-) Zweigen unterschieden, da die hier zu beachtenden Themen in beiden Zweigen die nahezu gleichen Voraussetzungen finden.

4.1. Begründung für das Unterrichten des Themas

Für eine Unterrichtseinheit zur Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne äußeres Magnetfeld lassen sich mehrere Gründe finden, diese durchzuführen. Die grundlegendsten finden sich gleich zu Beginn des Fachlehrplans für Physik in der Realschule⁵⁴. In diesem allgemeinen Fachprofil des Physikunterrichts wird angegeben, den S und S „als fächerübergreifendes Grundwissen zu vermitteln, dass die Naturwissenschaften keineswegs abgeschlossene Disziplinen sind“⁵⁵. Man soll ihnen zeigen, dass immer neue Probleme auftreten und die Physik, sowie die anderen Wissenschaften, an gewissen Punkten an ihre Grenzen stoßen. Was eignet sich dazu besser als ein Phänomen, welches leicht für die Schüler zu demonstrieren ist und immer noch keine definitive Auflösung in der Fachwissenschaft gefunden hat, wie es beim Auftreten der Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne Magnetfeld der Fall ist. Zur Demonstration sind nur eine handvoll Dinge notwendig, wie im Video [V5] zu sehen ist. Falls genügend Materialien vorhanden sind, ist der Versuch in Form des REM sogar leicht von den Schülern selbst durchzuführen.

Außerdem gehört es zum Erziehungs- und Bildungsauftrag des Physikunterrichts, Aufgeschlossenheit und Neugierde bei der Beschäftigung mit physikalischen Themen zu gewinnen⁵⁶. Dies soll dann auch zu Forscher- und Erfindergeist weiterführen. Dies ist durchaus vorstellbar mit dem REM oder Kugellagermotor zu realisieren, da mit den Schülern

⁵⁴ [20]

⁵⁵ [20]

⁵⁶ [20]

praktische Verwendungen der beiden Apparate diskutiert und sogar experimentell durchgeführt werden können. Darauf sollte viel Wert gelegt werden, da besonders beim Realschulunterricht von Anfang an die Praxis im Vordergrund stehen muss⁵⁷. Ebenso zum fächerübergreifenden Wissen zählt dem Lehrplan nach die Erklärung von physikalischen Aussagen anhand von Experimenten und Modellvorstellungen. Dies trifft beides auf die Versuche zur Kraft auf stromdurchflossenen Leiter ohne Magnetfeld zu, da mit einfacher experimenteller Auseinandersetzung etwaige Erklärungen und Theorien bestätigt oder widerlegt werden können (vgl. Unstimmigkeiten in der elektromagnetischen Theorie). Auch die Modellvorstellung kann hierbei geschult werden, weil bei der thermischen Begründung des Effekts von einer Volumenänderung im Metall ausgegangen wird, die ein Kenntnis vom Aufbau von Festkörpern voraussetzt. Die Modellvorstellung wird auch als „Arbeitsmethode der Physik“⁵⁸ bezeichnet, deren Vermittlung vom Lehrplan vorgeschrieben wird.

Ein weiteres Argument des Erziehungs- und Bildungsauftrags des Physikunterrichts an der Realschule wäre, dass die Schüler zu aktuellen technischen Problemen Bezug finden. Dabei soll erwähnt sein, dass es sich bei dem hier diskutierten physikalischen Phänomen sehr wohl um ein aktuelles Thema handelt. Dies lässt sich damit begründen, dass der Effekt erst seit Milroy im Jahr 1959⁵⁹ ernsthaft in der Fachwissenschaft behandelt wird und der neueste, hier untersuchte wissenschaftliche Aufsatz von McDonald stammt sogar aus dem Jahr 2011⁶⁰. Im Vergleich dazu sind die anderen Themen, welche vom Lehrplan obligatorisch vorgeschrieben sind, weitaus älter. Unter den Punkt der Aktualität fällt auch, den technischen Fortschritt, der auch immer weiter getrieben wird und auf den in der Schule gelernten physikalischen Grundlagen basiert, in der Auseinandersetzung mit den im Unterricht angesprochenen Themen zu erkennen. Hierfür kann der REM oder Kugellagermotor ebenso dienlich sein, da diese beiden Apparate durchaus das Potential zu einer technischen Erweiterung darstellen, in welcher Form auch immer. Bei Überlegungen dazu kann man der Kreativität der Schüler freien Lauf lassen. Treibt man diesen Punkt noch weiter, kann man sogar sagen, dass die Behandlung dieses Themas auch zur Umwelterziehung gehört. Betrachtet man nämlich zum Beispiel den REM als Lastentransporter (wie oben beschrieben und im Video [V3] zu sehen), so stellt dieser Motor eine alternative, umweltschonende Transportmöglichkeit dar. Also gibt es genug handfeste Gründe die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne Magnetfeld und die daraus resultierenden Experimente im Unterricht zu besprechen.

⁵⁷ [16]

⁵⁸ [20]

⁵⁹ [1]

⁶⁰ [7]

4.2. vorausgesetztes Wissen der Schülerinnen und Schüler

Damit der Effekt auch sinnvoll und ausgiebig mit den Schülern behandelt werden kann, muss natürlich deren Verständnis gewisser grundlegender physikalischer Dinge vorhanden sein. Dazu gehören neben den Themen, die in der 9. Jahrgangsstufe Stoff sind, auch Grundwissen aus der 7., vor allem aber auch der 8. Klasse. Darunter fallen unter Anderem die folgenden Dinge:

- Energieumwandlung und Energieerhaltung, sowie der Wirkungsgrad als Gütekriterium bei ebendiesen Energieumwandlungen
- der Energieerhaltungssatz, wenn man beispielsweise den Kugellagermotor als Perpetuum mobile zweiter Art thematisieren möchte, wie es von Marinow diskutiert wurde (vgl. 3.3. der Kugellagermotor)
- die Leistung als physikalische Größe, damit Marinows Erklärung zum Perpetuum mobile, welche ohnehin nicht ohne Weiteres zu verstehen ist, einigermaßen nachvollzogen werden kann

Der Stoff der 9. Klasse, der zu einer ausführlichen Diskussion über die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne Magnetfeld nötig ist, besteht des Weiteren aus den folgenden Themen:

Um zu verstehen, wie sich der Effekt anhand der Wärmelehre begründen lässt, muss den Schülern die Längen- sowie Volumenänderung von Festkörpern bei einer Temperaturänderung bewusst sein. Nur wenn dieses Verständnis gefestigt ist, kann eingesehen werden, dass die hier interessanten Motoren als thermische Maschinen fungieren. Doch um überhaupt nachzuvollziehen, dass sich die Festkörper bzw. Materialien bei eben diesen Motoren erwärmen und somit überhaupt eine Ausdehnung zur Folge haben, muss im Unterricht mit den S und S thematisiert werden, dass sich leitende Materialien bei Stromfluss durch Reibung erwärmen (sog. Ohmsche Wärme).

Neben diesen Themen, die sich der Wärmelehre zuordnen lassen, müssen den S und S zur Diskussion über den Ursprung der Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne Magnetfeld auch weitere Phänomene der Elektrizitätslehre nahe gebracht werden. Folgende Lernziele gemäß Lehrplan können bereits eine Basis für dieses Thema bilden: Das Magnetfeld eines geraden metallischen Leiters nach Ørstedt, sowie die Kraft auf einen stromdurchflossenen, geraden metallischen Leiter im Magnetfeld nach Lorentz. In diesem Zusammenhang muss auch der Einsatz der UVW-Regel der linken Hand eingeführt werden. Die Kenntnis dieser Tatsachen ist Voraussetzung zum Verständnis der Erklärung von K. McDonald, dessen Argumentation dadurch auch für Schüler verständlich gemacht werden

kann. Schließlich muss sollte noch aus dem Unterricht der 8.Klasse wiederholt werden, wie elektrische Energie in andere Energieformen umgewandelt werden kann. Auf Grundlage dieses Wissens, kann den S und S die Argumentation Marinows zur Effizienz des Kugellagermotors verständlich gemacht werden. Außerdem muss den S und S die Funktionsweise eines Elektromagneten bewusst sein, sowie deren Aufgabe im Zusammenhang mit dem Betreiben von Elektromotoren.

Mit diesen Grundlagen kann man nun eine Unterrichtseinheit zum Thema Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ohne Magnetfeld planen und durchführen.

4.3. Planung der Unterrichtseinheit in Form eines Projekts

Eine Unterrichtseinheit zum Thema der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld lassen sich in unterschiedlicher Weise durchführen. Auf Grund der Vielfältigkeit der fachlichen Bezüge bietet es sich an den Unterricht in Form eines Projekts durchzuführen.

Ein derartiges Projekt, deckt sich auch mit den Lehrplanvorgaben, die in jeder Jahrgangsstufe ein solches fordern. Zum besseren Verständnis soll nun zunächst kurz erläutert werden, was genau unter Projektunterricht zu verstehen ist.

Als Projekt bezeichnet man eine längere, teilweise auch fächerübergreifende Unterrichtseinheit, die durch Selbstorganisation der Lerngruppe gekennzeichnet ist. Dabei ist der Arbeits- und Lernprozess ebenso wichtig wie das inhaltliche Ergebnis oder Produkt des Projekts⁶¹. Das Prinzip, das dem Projektunterricht zugrunde liegt, lässt sich kurz zusammengefasst durch „learning by doing“ ausdrücken. Es beinhaltet, dass die Schüler*innen viele Freiräume bei der Beschäftigung mit dem Thema erhalten, und dass die Lehrkraft bei Lehr- und Lernprozess als Berater und Organisator fungiert und dadurch mehr im den Hintergrund wirkt. Die S und S sollen durch Mitverantwortung in der Planung, Durchführung und beim Ergebnis ein Bewusstsein für kooperatives Lernen entwickeln, da sie eigenständig und miteinander Wege finden müssen, die zum Ziel führen. Außerdem lernen sie somit Dinge sachlich zu diskutieren und eigene Anliegen vorzubringen, was eine Schlüsselqualifikationen für die weitere Schullaufbahn und Berufsausbildung darstellt. Nach dem Schweizer Pädagogen Karl Frey (1942-2005) folgt die Projektmethode einem Grundmuster in sieben Komponenten⁶². Auf dieser Grundlage soll versucht werden ein Projekt im Physikunterricht für die Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld zu formulieren. Doch dazu dann später (vgl. Absatz 4.3.3.) mehr.

⁶¹ [19]

⁶² [14]

4.3.1. Begründung die Unterrichtsmethode des Projektunterrichts

Natürlich kann man zum Unterrichten der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld im Physikunterricht mehrere Varianten in Betracht ziehen. Klassischer Frontalunterricht oder auch lehrergesteuerter Unterricht kommen da zunächst in den Sinn. Da es aber Zeichen guten Unterrichts ist, verschiedene Methoden anzuwenden⁶³, soll hier mit dem Projektunterricht eine Alternative zu den „klassischen“ Unterrichtskonzeptionen in Betracht gezogen werden. Die Projektmethode ist für Frey eine der attraktivsten Unterrichtsformen, da sie oberste Ziele des Bildungswesens erfüllt. Dazu gehören Erziehung zur Selbstständigkeit, Kooperation und Kritikfähigkeit⁶⁴. Dies wird durch die eigenständige Planung und Durchführung des Projekts durch S und S gewährleistet. Außerdem eignen sich die S und S durch ein Projekt viel Fachwissen an, welches sie auch nicht so schnell wieder vergessen, da selbstständig und selbsttätig erlerntes Wissen sich dauerhafter ins Gedächtnis einprägt. Dazu kommt auch noch, dass die Lehrkraft evtl. weniger Vorbereitungsaufwand als bei einer „normalen“ Unterrichtseinheit hat. Denn, wie bereits oben erwähnt, liegt es hauptsächlich an den S und S selbst, das Projekt zu gestalten und auszuführen, was bedeutet, dass der Lehrkörper eine beratende und organisierende Funktion im Hintergrund innehat. Seine Betreuung muss sicherstellen, dass sich S u S nicht in der Vielfalt der Möglichkeiten verirren. Diese Hintergrundarbeit entscheidet über den möglichen Erfolg eines **gut geführten** Projektunterrichts.

Des Weiteren werden die sog. „soft skills“ geschult, von welchen im modernen Berufsleben immer häufiger die Rede ist. Darunter fallen Kompetenzen wie, neben der eingangs erwähnten Kritikfähigkeit, vor allem Teamgeist und Problemlösefähigkeiten. Außerdem bringt der Projektunterricht noch weitere Vorteile und Chancen mit sich. Beispielsweise bietet diese Unterrichtsmethode den S und S die Gelegenheit die eigenen Interessen in hohem Maß in den Schulalltag einzubringen, wodurch sie möglicherweise mehr Bezug zu einem Thema entwickeln. Damit kann die Motivation, ein anfänglich unvertrautes Problem zu lösen, gesteigert werden. Außerdem ist in jedem der sieben Komponenten (s.u.) der Projektmethode die Erfüllung verschiedener Aufgaben nötig. Deren Zuordnung auf die Projektteilnehmer wird aber nicht ohne Weiteres durchgeführt, sondern die S und S müssen die Aufgabenstellungen selbst entsprechend der jeweiligen Fähigkeit wählen und verteilen, damit so jeder einen Teil zum erfolgreichen Gestalten des Projekts beiträgt. Somit besteht einerseits eine gute Möglichkeit zur Individualisierung, da jeder das erledigen kann, was ihm besonders

⁶³ [15]

⁶⁴ [24]

liegt, andererseits wird durch die Verteilung der Aufgaben ein kooperatives Lernen ermöglicht. Dadurch werden auch zusätzlich schwächere und stillere Schüler in den Ablauf und ins gemeinschaftliche Geschehen integriert⁶⁵.

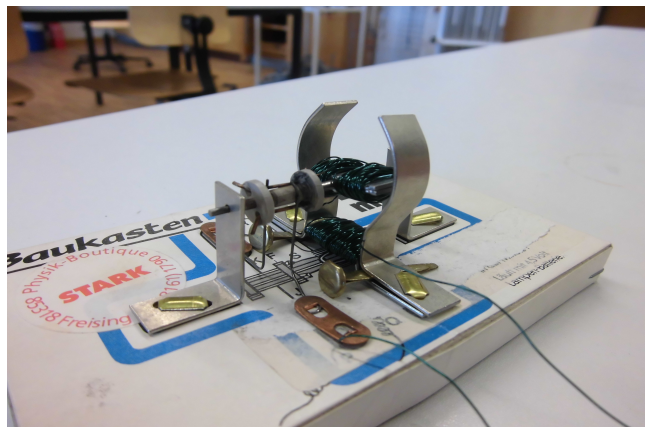
Neben all diesen Vorteilen muss aber erwähnt werden, dass die Projektmethode auch diverse Nachteile und Risiken birgt. Der wohl größte Grund dafür, dass man dieser Methode als Lehrkraft skeptisch oder abgeneigt gegenüber steht, ist der, dass sich der Ablauf schlecht planen lässt. Es gibt keinen linearen Plan wie beim lehrerzentrierten Unterricht, die Lehrkraft muss sich aber variable Ablaufkonzepte überleben um ggf. eingreifen zu können, damit nicht das Erreichen des Ziels ungewiss bleibt. Außerdem ist ein erhöhter Bedarf an Unterrichtszeit notwendig, um ein Projekt mit all seinen Teilschritten durchzuführen⁶⁶.

Dennoch sollte man dem Projektunterricht eine Chance geben, da er viele Vorteile mit sich bringt und zudem durch die Verwendung verschiedener Methoden ein guter Unterricht gewährleistet wird.

4.3.2. Thema der vorangehenden Stunden

Bevor die eben erwähnten sieben Teilschritte des Projektunterrichts nach und nach für die geplante Unterrichtseinheit erläutert werden, soll noch der Ablauf Vorstunden beschrieben werden, um die passende Einordnung in das 9. Schuljahr nachzuvollziehen. Die Unterrichtsstunden vor dem Projekt zur Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld sollen das Thema „Elektromotoren“ behandeln. Dies wird explizit im aktuellen Lehrplan der 9. Klasse Realschule sogar als Projekt empfohlen⁶⁷. Hierbei ist vorstellbar, dass die S und S selber einen Elektromotor zusammenbauen. Dafür gibt es eine Art Standardmodell für Schulen, die in fertiggestellter Form so aussieht:

Abb. 21: Aufbau Elektromotor ⁶⁸



⁶⁵ [17]

⁶⁶ [17]

⁶⁷ ...[20]

⁶⁸ Eigene Aufnahme

Dabei muss natürlich auch die Funktionsweise des Elektromotors im Unterricht thematisiert werden. Hier soll nun in Kurzform beschrieben werden, welche Kompetenzen den S und S dabei vermittelt werden:

Ein Elektromotor besteht aus einer drehbaren Spule mit Eisenkern (dem sog. Doppel-T-Anker) und zwei gegeneinander isolierten Halbringen (ein sog. Kommutator). An diesen stehen zwei Kohle- bzw. Metallbürsten in Kontakt und schleifen dadurch an ihnen. Schließt man nun diese Bürsten an die Pole einer Gleichstromquelle an, so fließt über die Bürsten und die Halbringe Strom durch die Spule. Dadurch entsteht ein Magnetfeld mit Nord- und Südpol. Damit der Motor in Bewegung versetzt wird, bringt man ihn zwischen die Pole eines äußeren Magneten. Nun kommt es zu einer Anziehung zwischen den ungleichnamigen Polen des äußeren und des Elektromagneten. Es kommt zur Drehung der beweglichen Spule. Die Spule rotiert dann so lange weiter bis sich die entgegengesetzten Pole gegenüberstehen und die Bürsten die Isolierstellen zwischen den Halbringen berühren. Dadurch ist aber der Stromkreis unterbrochen, der für das Magnetfeld des Elektromagneten verantwortlich ist. Somit baut sich dieses rapide ab. Eigentlich wäre hier die Bewegung des Motors zu Ende, doch aufgrund der Trägheit der drehbaren Spule bewegt diese sich noch ein Stück weiter, sodass die Metallbürsten wieder in Kontakt zu den Halbringen stehen. Doch nun berühren die Kontakte die jeweils anderen Halbringe des Kommutators im Vergleich zum Beginn, wodurch eine Umpolung des Spulen-Elektromagneten ausgelöst wird. Dies hat zur Folge, dass sich die gleichnamigen Magnetpole der Spule und des Hufeisenmagneten gegenüberstehen und sich dadurch erneut voneinander abstoßen. Erneut wird dann Nordpol der Spule vom Südpol des Magneten angezogen, ebenso wie der Nord- den Südpol anzieht. Dieser Vorgang wiederholt sich dann periodisch und es kommt somit zu einer konstanten Drehbewegung des Motors.

Dieser eben beschriebene Vorgang muss also den S und S vertraut sein und es sollte ihnen die Möglichkeit gegeben werden einen solchen Motor selbst zu bauen. Das selbsttätige Basteln eines solchen Elektromotors ist v.a. sehr wichtig, da beim Physikunterricht an der Realschule immer wieder der praktische Aspekt in den Vordergrund gestellt werden muss⁶⁹. Die Besprechung des oben beschriebenen Vorgangs kann mit Hilfe eines Arbeitsblattes verwirklicht werden. (vgl. Anhang: „Funktionsweise eines Elektromotors“. Abbildungen darauf alle bezogen aus⁷⁰) Dabei sollen die einzelnen Schritte mit den S und S mit Hilfe des Lückentextes besprochen werden. Im Anschluss sollte noch demonstriert werden, dass durch Optimierung dieses Aufbaus sehr effiziente und leistungsstarke Motoren gebaut werden können.

⁶⁹ [16]

⁷⁰ [23]

4.3.3. Planung und Ablauf des Projekts

Wie bereits eingangs im Abschnitt 4.3 erwähnt, besteht ein Projektunterricht nach Frey aus sieben Teilschritten, welche nun im Folgenden erläutert werden sollen⁷¹. Gleichzeitig wird dabei beschrieben, wie der jeweilige Teilaspekt des Projekts zum Thema der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld im Physikunterricht einer 9. Klasse an einer Realschule aussehen und ablaufen könnte. Dabei soll noch angefügt werden, dass nach Frey die sieben Komponenten während des Projekts ganz klar hervortreten müssen, sodass ein außenstehender Beobachter diese erkennen könnte.

4.3.3.1. Projektinitiative

Die erste Komponente des Projektunterrichts wird als Projektinitiative bezeichnet. Darin ist es die Aufgabe anhand des gestellten Themas eine Idee, oder Initiative hervorzurufen, aus der sich dann das Projekt entwickeln kann.

Wie diese erste Phase im Physikunterricht in der 9. Klasse einer Realschule zum angesprochenen Thema verlaufen könnte, soll nun im Folgenden ausgeführt werden:

Zu Beginn der Unterrichtsstunde wird noch einmal kurz der Elektromotor und seine Funktionsweise wiederholt (vgl. oben, Abschnitt 4.3.2.). Ist dann dadurch der Erwerb der nötigen Kompetenzen sicher gestellt worden, so wird nun den S und S der Roller Electrical Motor demonstriert, siehe hierzu das Video [V2] und Abbildung 22. Jedoch sollte im Unterricht auf den Namen REM verzichtet werden. Es kann dazu ein einfaches deutsches Synonym verwendet werden, wie beispielsweise Rollen-Motor o. Ä.

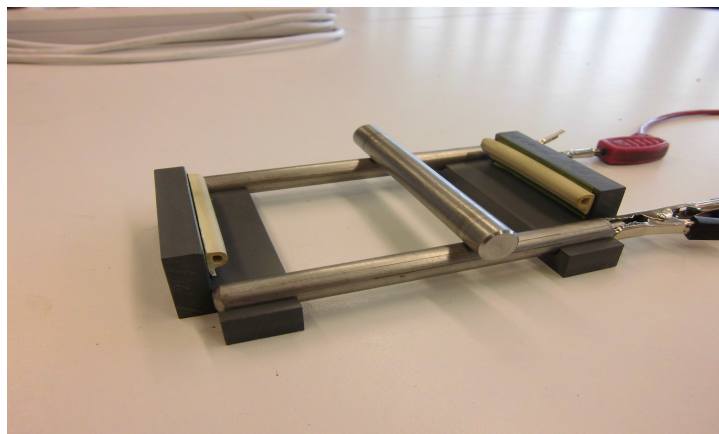


Abb. 22: der Roller Electrical Motor oder Rollen-Motor⁷²

⁷¹ [14]

⁷² Eigene Aufnahme

Dann muss die Frage an die Klasse gerichtet werden, wieso denn dieser Apparat überhaupt so funktioniert, wie er es augenscheinlich tut. Dabei werden die S und S mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit darüber argumentieren, dass der lose aufliegende Leiter durch elektromagnetische Effekte zu rollen beginnt, da sie aus der Vorstunde wissen sollten, dass für einen Elektromotor ein Magnetfeld notwendig ist. Dabei kann dann die Lehrkraft entgegen, dass aber eindeutig kein äußeres Magnetfeld vorhanden ist und auch das Magnetfeld der Erde dazu zu schwach ausgeprägt ist.

Durch diesen scheinbaren Widerspruch sollte nun das Interesse der S und S geweckt sein und ihr Forscherdrang aktiviert sein. Dies muss dann von der Lehrkraft ausgenutzt werden, indem sie mit der Klasse diskutiert, wie denn der tatsächliche Grund für das Auftreten des Effekts gefunden werden kann. Dies ist dann der eigentliche Startschuss für die Phase der Projektinitiative. Dabei sollen die S und S selbst überlegen, wie man den Ursprung für diesen Effekt ergründen könnte. Die Vorschläge der S und S müssen dann gesammelt und schriftlich festgehalten werden. Das geschieht am besten dadurch, dass die Ideen der S und S auf Plakate geschrieben werden. Somit sind die Einfälle für die gesamte Klasse immer wieder nachzulesen und alle Vorschläge sind als Übersicht einzusehen. Mögliche Vorschläge der S und S zur Klärung des Effekts können dabei die Folgenden sein:

- die selbstständige Durchführung des Experiments zum Rollen-Motor und eine Untersuchung der Abhängigkeit des Effekts von diversen physikalischen Größen wie Spannung und Stromstärke
- die Ursache für das Phänomens durch ausgiebige Recherche zu finden. Dabei kommen Internet- sowie Literaturrecherche in Frage, wobei das Problem dabei ist, dass die einschlägige Literatur nur auf Englisch vorhanden ist.
- Suche nach möglichen Nutzanwendungen,
- Bau von verschiedenen Varianten um die Effizienz zu testen
- ...

Dies sind soweit die möglichen Vorschläge der S und S. Doch dabei wird noch lange nicht alles abgedeckt, was zur Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld behandelt werden kann. Deshalb ist es hier in der Phase der Projektinitiative Aufgabe der Lehrkraft die S und S vorsichtig darauf hinzuweisen, welche Themen zusätzlich angegangen werden können. Diese Hinweise auf weitere interessante Unterpunkte können folgendermaßen aussehen:

Indem der Klasse erneut anhand des Rollen-Motors vorgeführt wird, dass der Effekt unter Verwendung verschiedener Materialien unterschiedlich stark ausfällt, können die S und S somit auf die Materialabhängigkeit des Phänomens hingewiesen werden. Dies kann dann im

Anschluss auch als Vorschlag für die Projektinitiative festgehalten werden, in der Art und Weise, dass es zur Aufgabe gemacht wird, verschiedene Materialien auf ihre Effizienz beim Rollen-Motor zu prüfen und Unterschiede und Gemeinsamkeiten der verwendeten Stoffe zu finden. Des Weiteren kann der Klasse bereits in dieser Phase des Projektunterrichts ohne Probleme offenbart werden, dass auch in der Fachwissenschaft noch kein definitiver Grund für das Auftreten der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld gefunden wurde. Aber es gibt einige Hinweise, die eine mögliche Ursache verraten. Einer dieser Hinweise ist die Tatsache, dass der Rollen-Motor, wenn es unter Stromfluss steht, ein charakteristisches Geräusch abgibt, welches jedoch nicht auftritt, wenn man den losen Leiter manuell zum Laufen bringt. Somit kann es zur Initiative formuliert werden, herauszufinden, was es mit diesem Geräusch auf sich hat und inwiefern dieses einen möglichen Grund für das Phänomen angibt (vgl. hierzu Abschnitt 2.2.3.). Eine weitere Alternative die S und S auf ein anderes Thema für dieses Projekt zu lenken, ist die Demonstration des Kugellagermotors. Siehe hierzu Video [V1] und Abbildung 23.

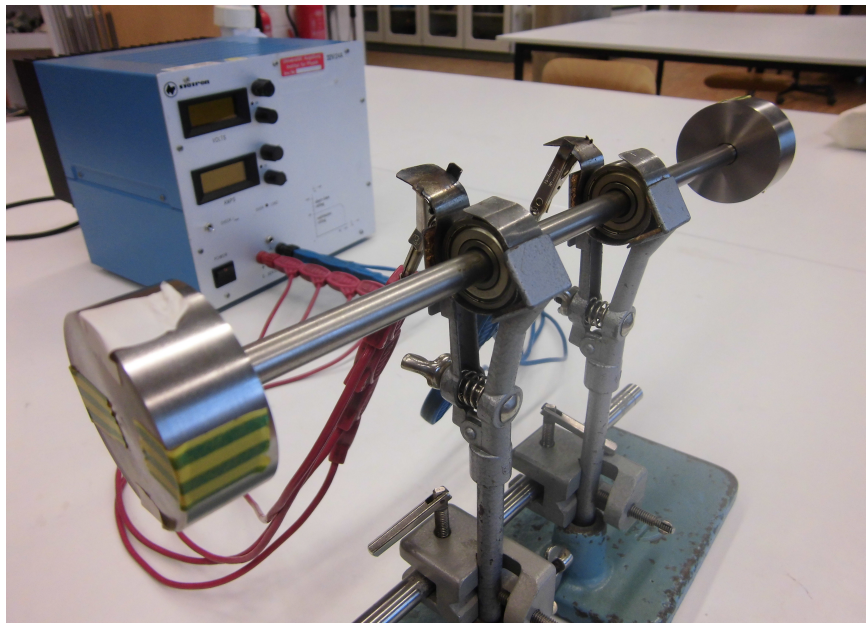


Abb. 23: Kugellagermotor⁷³

Dabei müssen die S und S entdecken, dass dessen Funktionsweise auf dem gleichen Effekt beruht wie der bereits beobachtete Rollen-Motor. Dann kann eine weitere Initiative so formuliert werden herauszufinden, wie sich diese Motoren in der Praxis anwenden lassen könnten und ob es eventuell weitere Möglichkeiten gibt, die Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld für eine technische Anwendung zu nutzen.

Zusammengefasst lassen sich also diese Vorschläge für die Projektinitiative formulieren:

- Versuchen das Auftreten der Kraft auf den Leiter experimentell durch Abhängigkeit

⁷³ Eigene Aufnahme

von anderen physikalischen Größen zu erklären

- dem Effekt durch Recherche auf den Grund zu gehen
- die Materialabhängigkeit zu überprüfen, das effizienteste Material zu finden und die Eigenschaften zu finden, die eine effizientere Funktionsweise bewirken können
- das charakteristische Geräusch beim Auftreten des Effekts zu erklären und dadurch versuchen, den Effekt selbst aufzuklären
- praktische Anwendungen für den REM und den Kugellagermotor zu finden, sowie eventuell weitere Anordnungen, die das Phänomen ausnutzen

Dies sind also mögliche Ideen, die in der Phase der Projektinitiative gefunden werden können. Sobald diese dann schriftlich festgehalten worden sind, sollen sich Lehrkraft und S und S absprechen, welche Themen von Interesse sind und bei welchen eine Behandlung auch realistisch durchführbar erscheint. Dann muss aus diesen Vorschlägen gemeinsam ein Ziel formuliert werden. In der Folge gilt es dann, dieses Projektziel auch zu verwirklichen. Doch bevor dies möglich ist, müssen noch weitere Phasen durchlaufen werden.

4.3.3.2. Auseinandersetzung mit der Projektinitiative

Die nächste Phase des Projektunterrichts wird nach Frey als die Auseinandersetzung mit der Projektinitiative bezeichnet.

Diese lässt sich auch wiederum in zwei Phasen aufteilen. In der ersten Phase der Auseinandersetzung mit der Projektinitiative müssen die Rahmenbedingungen für die Diskussion über die zuvor gesammelten Projektideen klar gestellt werden. Darunter fallen Punkte wie der zeitliche Rahmen oder Gesprächsregeln während der Diskussion. Erst wenn diese geklärt sind, können in der zweiten Phase die nötigen Beschlüsse gefasst werden, wie die zuvor formulierten Ideen genau umzusetzen sind. Daraus entwickelt sich die Erstellung einer sog. Projektskizze, was als ausgereifterer Projektvorschlag zu verstehen ist.

Das Aussehen dieser Phase der Auseinandersetzung mit der Projektinitiative im Bezug auf die Unterrichtseinheit zur Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld lässt sich folgendermaßen beschreiben:

Für die nötigen Rahmenbedingungen zur Diskussion ist zu sagen, dass v.a. deren zeitlicher Rahmen möglichst straff gehalten werden soll. Denn sollte man bei dem hier stattfindenden Entscheidungsprozess schon zu viel Zeit verlieren, bleibt zu wenig davon um zum eigentlichen Projekt zu kommen, das durchaus zeitintensiv werden kann. Auch die Klärung der Gesprächsregeln zur Diskussion sollte zügig von statten gehen. Dabei werden auch wohl

die „klassischen“ Redevorschriften genutzt, wie zum Beispiel: „Man muss den Klassenkameraden ausreden lassen“; „Jeder sollte zu Wort kommen;“ etc.

Sind nun dadurch die Voraussetzungen für eine sachliche Debatte gegeben, werden die Vorschläge aus der Phase der Projektinitiative in der Klasse diskutiert. Dies bezieht sich z.B. auf den Umfang eines jeden Themas, die Bearbeitungszeit, die Sozialform, die verwendet werden soll, sowie die Frage, ob die gesteckten Ziele erreichbar sind. Dabei sollen zwar hauptsächlich die S und S zu Wort kommen, aber die Lehrkraft muss natürlich einschreiten, sobald die Diskussion nicht mehr zielführend ist oder zu unsachlich argumentiert wird. Für das Projekt zur Kraft auf stromdurchflossene Leiter lässt sich die Verwirklichung und Ausführung der Projektinitiative so vorstellen:

Die oben beschriebenen Vorschläge (vgl. Abschnitt 4.3.3.1.) sollen nach Möglichkeit alle bearbeitet werden. Da man fünf zu bearbeitende Bereiche gefunden hat, lässt sich vorstellen, dass man mindestens fünf Unterrichtsstunden für die tatsächliche Durchführung des Projekts berechnet, plus eine extra Stunde, die als Puffer dient. Dann kann noch bezüglich der Sozialform entschieden werden, dass die Klasse in fünf Gruppen aufgeteilt wird. Dabei sollte aber auch auf eine sinnvolle Gruppengröße geachtet werden; ggf. ist die Themenverteilung auf einen Bereich mehr oder weniger umzuformulieren, um dann mit 4 oder 6 Gruppen zu arbeiten; Gruppengrößen über 5 Mitglieder arbeiten im Allgemeinen nicht mehr zielführend. Jede Gruppe sollte für jeden Arbeitsbereich eine Unterrichtsstunde Zeit bekommen, um sich damit intensiv beschäftigen zu können. Die Gruppenaufteilung hat auch den Grund, dass für die jeweiligen Experimente nur begrenzte Anzahl an Materialien zur Verfügung stehen und es sich in kleineren Gruppen zumeist einfacher und zeitlich effizienter über ein Thema diskutieren lässt.

All dies muss in der Phase der Auseinandersetzung mit der Projektinitiative entschieden werden. Dadurch ist nun aus den vagen Vorschlägen aus der Projektinitiative eine konkrete Projektskizze geworden.

4.3.3.3. Entwicklung zum Betätigungsgebiet

In dieser dritten Phase gilt es die nun gefundene Projektskizze zu einem handfesten Projektplan auszuweiten. Doch eine vernünftige Planung ist für S und S durchaus anspruchsvoll und eventuell sogar überfordernd, weshalb man davon ausgehen kann, dass der anfängliche Plan nach einer gewissen Zeit modifiziert werden muss. Man sollte daher eine sog. „rollende Planung“⁷⁴ anwenden, was bedeutet, dass der geplante Ablauf während des

⁷⁴ [24]

Projekts immer wieder bearbeitet und abgeändert werden muss. Dies muss die Klasse zusammen mit der Lehrperson abklären.

Für den endgültigen Projektplan muss nun zunächst der exakte zeitliche Rahmen der einzelnen Aufgabenbereiche definiert werden. Dabei muss man bei der Entscheidung beachten, dass die beiden Aufgaben, die einen experimentellen Umgang erfordern, mehr Zeit in Anspruch nehmen. Deshalb sieht der zeitliche Rahmen für das hier betrachtete Projekt so aus, dass für die experimentelle Überprüfung der Abhängigkeit des Effekts von diversen physikalischen Größen sowie vom verwendeten Material zwei Unterrichtsstunden gerechnet werden müssen. Für die anderen drei Themen, nämlich die Recherche, das Untersuchen des Geräuschs und das Finden von praktischen Anwendungen kann jeweils in einer Unterrichtsstunde abgehandelt werden. Wobei es natürlich hierbei dazu kommen kann, dass man sich in der Planung vollkommen irrt und die Experimente weniger Zeit beanspruchen und die restlichen Aufgabenbereiche dafür umso mehr Zeitaufwand benötigen. Dabei muss dann die rollende Planung in Kraft treten bzw. Flexibilität bewiesen werden. Doch dies zeichnet sich erst während der Durchführung des Projekts ab.

Im zweiten Schritt des Projektplans müssen die anfallenden Aufgaben sinnvoll verteilt werden. Darunter fällt aber nicht nur die Verteilung der Aufgaben innerhalb der Klasse, sondern auch die Lehrkraft muss ihre Pflichten erfüllen, die sie auch teilweise von den S und S zugewiesen bekommt. Für die Lehrperson sind dies im hier betrachteten Projekt zur Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld hauptsächlich die Beschaffung der nötigen Materialien. Dies beinhaltet den Schülern zur Durchführung der Experimente folgendes bereitzustellen:

- genügend runde Metallstücke, die für den REM als Schienen bzw. als Mobile fungieren.
- für die Überprüfung der Materialabhängigkeit müssen diese Zylinder aus unterschiedlichen Stoffen gefertigt werden;
- ausreichend Spannungsquellen, wobei sich dies als einfach herausstellt, da nur einfache Batterien nötig sind;
- Messinstrumente für die Untersuchung der Abhängigkeit von diversen physikalischen Größen (Volt- und Amperemeter etc.).

Die S und S hingegen müssen auch innerhalb der Gruppe die Aufgaben verteilen. Beispielsweise bei Messungen müssen von einem Gruppenmitglied die Werte abgelesen werden, andere sind für den Auf- und Abbau der Experimente zuständig, wieder andere sind für das Festhalten der Ergebnisse verantwortlich. Aber jedes einzelne Gruppenmitglied muss sich dennoch, neben seiner „Spezialaufgabe“ an der Diskussion in der Gruppe beteiligen. Bei

der Recherche für den Grund des Phänomens oder auch den praktischen Anwendungen sieht eine mögliche Verteilung der Aufgaben so aus, dass ein Teil der Gruppe sich im Internet informiert, ein anderer Teil versucht passender Literatur zu finden etc. Weitere kleinere oder größere Aufgaben, die zu erfüllen sich noch im weiteren Verlauf des Projekts herauskristallisieren, müssen dann später noch verteilt werden.

Ein weiterer wichtiger Schritt, der in der Phase der Entwicklung zum Betätigungsgebiet erfüllt werden muss, ist die eindeutige Formulierung des Projektziels. Natürlich steht im Projekt für die Lehrkraft das Ziel im Vordergrund, dass die Schüler gewisse Kompetenzen erwerben (vgl. Abschnitt 4.3.2.). Doch neben diesem Ziel, das sich für die S und S eher „im Hintergrund“ abspielt, muss ein Ziel oder Produkt des Projekts formuliert werden, welches dann für sie und für den Rest der Schule einsehbar ist. Für ein Projekt zur Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld kann das Endprodukt als eine Ausstellung im Schulgebäude realisiert werden. Dazu werden dann Plakate beschrieben, die dann das erworbene Wissen und die Ergebnisse der Experimente schildern. Auch ein funktionierender Motor oder zumindest Videomaterial über das Laufen der jeweiligen Apparate soll ausgestellt werden.

Schließlich müssen noch die Realisierungsbedingungen geklärt werden. Dazu gehören die Klärung der Fragen, ob sämtliche nötige Materialien beschaffen werden können, ob zusätzliche Räume notwendig sind o.Ä. Da die Beschaffung der Materialien hauptsächlich von der Lehrkraft erfüllt werden kann, muss sie den S und S hierbei zuarbeiten. Aber da wie bereits oben beschrieben (vgl. 4.3.3.1.) das nötige Material nicht allzu schwer anzuschaffen ist, sollte das kein Problem darstellen. Nur zur Untersuchung der verschiedenen Stoffe, aus denen sich der REM zusammengesetzt werden kann, könnte das etwas schwieriger werden. Doch dazu können dann die S und S Kontakt zu metallverarbeitenden Firmen und Unternehmen aufnehmen, die solches Material zur Verfügung stellen können. Eine weitere Realisierungsbedingung ist die Bereitstellung der nötigen Räumlichkeiten. Doch hierzu ist eigentlich nur die Beschaffung des Computerraums von Nöten zur Internetrecherche. Ansonsten können die Experimente problemlos im Physikraum durchgeführt werden, da sie kaum größeren Platz einnehmen.

Sind all diese Punkte erfüllt so kann nun die eigentliche Durchführung des Projekts gestartet werden.

4.3.3.4. verstärkte Aktivitäten im Betätigungsgebiet

Nach der Vollendung des (zumindest vorläufigen) Projektplans kommt es nun in der vierten Phase des Projektunterrichts zu den sog. verstärkten Aktivitäten im Betätigungsgebiet, oder auch einfach kurz: zur Projektdurchführung. Nun zeigt sich auch, ob die gewählte Planung vernünftig war und ob sie sich realisieren lässt.

Hier sollen sich also die S und S in ihren Gruppen den zu bearbeitenden Themen widmen. Grundlage der Durchführung muss dabei die enge Zusammenarbeit in der Klasse und das gemeinsame Projektziel sein⁷⁵. Aufgabe der Lehrkraft ist es hierbei lediglich beratend und organisierend die Klasse zu unterstützen, sowie den Pflichten nachgehen, die sie bei der Verteilung der Aufgaben in der vorangegangenen Phase zugewiesen bekommen hat (vgl. Abschnitt 4.3.3.3.).

Zur Organisation und Beratung durch die Lehrperson im Projekt zur Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld gehören unter Anderem die folgenden Dinge:

- dafür sorgen, dass der zeitliche Rahmen eingehalten wird
- darauf achten, dass die Aufgaben vernünftig bearbeitet werden und die Verteilung der Aufgaben eingehalten wird
- auf die Einhaltung der aufgestellten Regeln achten
- dafür sorgen, dass die verwendeten Materialien für die Experimente nach der Durchführung wieder an ihren kommen
- die S und S immer wieder auf das Projektziel hinweisen

Sollte der Lehrkraft jedoch eine Nicht-Einhaltung der eben erwähnten Punkte auffallen, so muss es zur Einführung von Zwischenstopps kommen. Auf diese wird dann genauer in der sechsten und siebten Phase des Projektunterrichts eingegangen (vgl. Abschnitte 4.3.3.6. und 4.3.3.7.).

4.3.3.5. Projektabschluss

Ein Projekt sollte auch nicht ohne Weiteres einfach so zu Ende gehen, da sonst möglicherweise ein zu großer Bruch zwischen Projektunterricht und normalem Schulalltag entstehen könnte. Deshalb muss nach Erreichen des Ziels ein geeigneter Abschluss erfolgen. Dazu gehört vor allem ein intensiver Rückblick über den Ablauf. Bei dieser Revision muss die Klasse selbstkritisch mit sich ins Gericht gehen und sich gewissenhaft Fragen stellen. Beispielsweise die Frage, was ursprünglich als Ziel ausgegeben wurde und ob es tatsächlich

⁷⁵

erreicht wurde, oder auch zu reflektieren, was die S und S am Projekt gut oder schlecht fanden. Schließlich gilt es zu klären, wie es nun nach einem größeren Projekt im Unterricht weitergehen kann bzw. soll.

Zum Projekt der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld könnte der Projektabschluss demnach folgendermaßen aussehen:

Nachdem die Ausstellung erfolgt ist und somit das Projektziel erreicht wurde, muss nun darüber reflektiert werden. Dafür muss eine weitere Unterrichtsstunde angesetzt werden. Diese Reflexion kann in Form einer offenen Diskussion erfolgen, wobei jedoch Wert darauf gelegt werden sollte, dass jeder in der Klasse mindestens einmal zu Wort kommen sollte. Dabei sollten folgende Fragen unbedingt geklärt werden:

- Ist das Thema „Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne äußeres Magnetfeld“ befriedigend aufgearbeitet?
- Hat sich das Thema als so interessant erwiesen, wie man bei der Projektplanung erwartete?
- Ist die Gruppen- und Aufgabenverteilung gelungen?
- Waren die Materialien für die Experimente ausreichend und passend vorhanden?
- Konnten die Aufgaben zufriedenstellend erfüllt werden?
- Kann aus dem Effekt praktischer Nutzen gezogen werden?
- Haben alle Ihre Ideen einbringen können?
- Ist die Teamarbeit in den Gruppen gelungen?
- Etc.

Somit kann in der Klasse gemeinsam ein Resümee gezogen und entschieden werden, ob die Durchführung des Projekts den Aufwand Wert war. Dies ist nützlich für die S und S, da sie über ihren eigenen Arbeitsprozess reflektieren müssen und Selbstkritik üben können. Doch auch für die Lehrkraft ist der Projektabschluss wichtig, da so erkennbar wird, ob das Projekt erfolgreich war. Aber nicht nur in der Hinsicht auf das Projektziel, sondern auch auf dem Weg dort hin bezüglich der Aufgabenstellung und der verwendeten Sozialformen.

4.3.3.6. Fixpunkte

Ganz im Gegenteil zu den zuvor angeführten fünf Phasen des Projektunterrichts ist für die Fixpunkte, die als eine Art „Kontrollstopp“ zu verstehen sind, kein fester Platz in diesem Schema vorgesehen. Sie sind Zwischenhalte, die organisatorischen Zwecken dienen und an denen ein Informationsaustausch stattfinden sollte. Außerdem kann man somit Auskunft über

den momentanen Projektstand erhalten. Dadurch soll gewährleistet werden, dass möglichen Problemen vorgebeugt wird und eventuelle zusätzliche Themenbereiche nicht übersehen werden. Auch sollte durch sie immer wieder das Projektziel vor Augen geführt werden. Die Zeitpunkte, an denen die Fixpunkte gesetzt werden, hängen vom Fortschritt des Projekts ab. Es ist aber auch sinnvoll diese Kontrollstopps in schöner Regelmäßigkeit durchzuführen, zum Beispiel zu Ende oder Beginn der einzelnen Unterrichtseinheiten.

Doch letztendlich lässt sich die Häufigkeit und der Zeitpunkt dieser Fixpunkte, oder Kontrollstopps, nicht pauschalisieren, weshalb nicht ohne Weiteres hier geeignete Vorschläge zu konkreten Fixpunkten für das Projekt zur Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld gemacht werden können.

4.3.3.7. Metainteraktionen

Neben den organisatorischen Kontrollen muss es auch für eine kritische Beurteilung des Projektfortschritts während der eigentlichen Durchführung diverse Unterbrechungen geben. Diese „Denkpausen“ werden Metainteraktionen genannt. Darin werden dann Probleme thematisiert, die nichts mit dem Thema an sich zu tun haben, sondern mit dem Arbeitsprozess an sich und den Interaktionen zwischen den Teilnehmern am Projekt. Mögliche Probleme dabei wären: Arbeitsunlust bei den S und S; Beziehungsprobleme in der Klasse; Aktivierung von zurückhaltenden S und S; etc. Wie bei den Fixpunkten der sechsten „Phase“ kann eine Metainteraktion zu jedem Zeitpunkt des Projektes stattfinden. Aber je nach Klassenklima und Interesse der S und S an der Thematik können solche Denkpausen oft, weniger häufig oder vielleicht nur im Rahmen des Projektabschlusses vorkommen.

Wie bei den Fixpunkten soll hier auf eine beispielhafte Übertragung auf das hier gewählte Projekt verzichtet werden, da der Einsatz der Metainteraktionen von zu vielen Variablen abhängt. Deren Häufigkeit und die Wahl des Zeitpunkts muss also je nach Verlauf des Projekts geeignet gewählt werden. Es liegt dabei in der Fürsorgepflicht der das Projekt betreuenden Lehrkraft, die Notwendigkeit von Metainteraktionen zu erkennen und zu gegebener Zeit diese anzustoßen.

5. Zusammenfassung und persönliche Stellungnahme

Betrachtet man nun noch einmal rückblickend die hier behandelten Punkte von den Erklärungsversuchen, über die praktischen Anwendungsmöglichkeiten bis hin zu den didaktischen Überlegungen zum Thema der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld, lassen sich nun folgende Schlüsse ziehen:

Zu den diversen Versuchen den hier betrachteten Effekt zu erklären, bleibt abschließend zu sagen, dass es also immer noch keine endgültige qualitative wie quantitative physikalische Beschreibung gibt, die das Phänomen geeignet deuten kann. Außerdem ist erstaunlich, dass es sich hierbei offensichtlich um einen Versuch handelt, der sich nicht mit elektromagnetischen Theorien klären lässt. Sieht man jedoch als Beobachter erstmals diesen Effekt in welcher Form auch immer, sei es als Kugellagermotor oder REM, würde man aufgrund des Auftretens von Strömen auf eben diese Theorien zurückschließen. Doch wie sich zeigt, folgt der Effekt der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld eher einer thermischen Beschreibung, die über weite Bereiche der Experimente richtig zu sein scheint. Dennoch bin ich hier der Meinung, dass dem Phänomen mehr Beachtung geschenkt werden sollte, da sich bei einem vollendeten Verständnis dann damit ein technischer Fortschritt erzielen ließe.

Erst mit der hundertprozentig richtigen Beschreibung kann ein praktischer Nutzen aus dem Ganzen gezogen werden. Die Anwendungsmöglichkeiten haben aber meiner Meinung nach ein großes Potential in sich, betrachtet man nur einmal die Vorstellung Marinows, dass es sich bei dem von ihm betrachteten REM möglicherweise um ein Perpetuum mobile zweiter Art handeln könnte. Doch vorsichtiger formuliert, handelt es sich auf alle Fälle um eine sehr effiziente Maschine, die es verdient genauer betrachtet zu werden. Auch die Vorstellung, dass sich so ausschließlich durch Stromfluss Lasten transportieren lassen, oder Bahnwagen eine zusätzliche Beschleunigung erfahren können, lässt die Meinung vertreten, dem Effekt mehr Zuwendung zu schenken.

Auch das didaktische Potential hinter der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne Magnetfeld ist nicht zu verachten. Denn es kann so mit einfachen Mitteln die Nichtabgeschlossenheit der Naturwissenschaften demonstriert werden. Somit kann der Forschungsdrang und Interesse bei den Schülern geweckt werden. Auch die aktive Beschäftigung mit dem Phänomen in Form einer alternativen Unterrichtsmethode, nämlich des Projektunterrichts, scheint dabei sehr sinnvoll. Denn so wird noch zusätzlich die Kreativität der Schüler gefordert und mit der selbstgesteuerten Auseinandersetzung bleibt mehr im Gedächtnis der S und S hängen. Denn „ohne Tat bleibt der schönste Gedanke

bläss⁷⁶.

Somit bin ich davon überzeugt, dass dem Phänomen der Kraft auf stromdurchflossene Leiter ohne äußeres Magnetfeld in der Fachwissenschaft, als auch in didaktischer Sichtweise mehr Beachtung geschenkt werden sollte.

Bedanken möchte ich mich noch bei StD Rudi Böck für die von ihm geleistete sachstrukturelle Vorarbeit und die vielen nützlichen Tips.

⁷⁶ Mahatma Gandhi

II. Anhang

Videoverzeichnis:

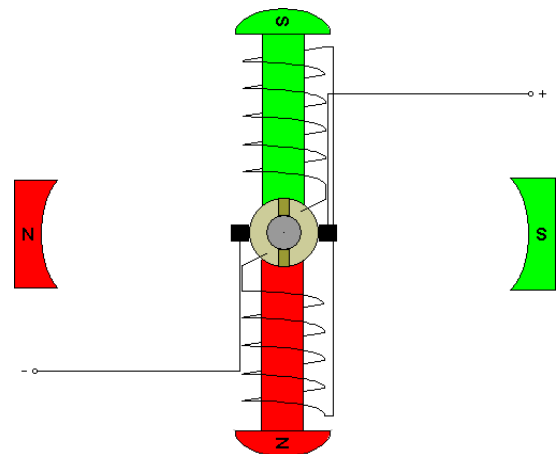
- [V1] der Kugellagermotor
- [V2] der Roller Electrical Motor (REM)
- [V3] der belastete REM
- [V4] das beim REM auftretende Geräusch
- [V5] die verschiedenen Startrichtungen des REM

Arbeitsblätter:

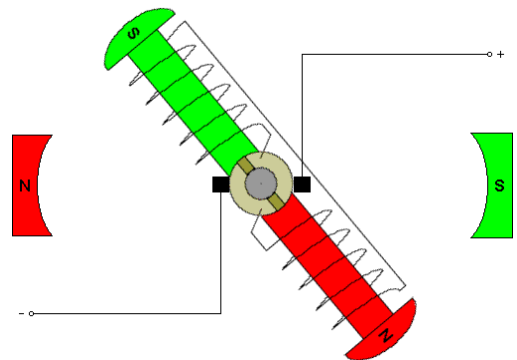
- [A1] Funktionsweise eines Elektromotors (nächste Seite)

Funktionsweise eines Elektromotors

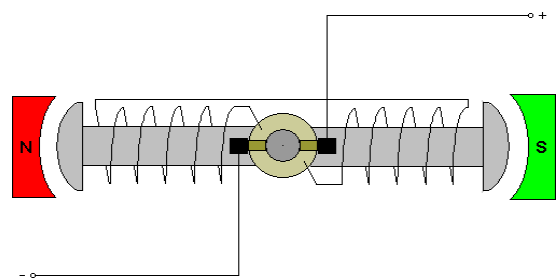
Eine drehbare Spule mit _____ besitzt in der Mitte zwei gegeneinander isolierte Halbringe an denen _____ Schleifen. Schließt man diese an die Pole einer _____ an, so fließt über die _____ und _____ Strom durch die Spule. Dadurch entsteht ein _____ Um eine _____ zu erhalten muss um die Spule ein weiterer Magnet angebracht werden.



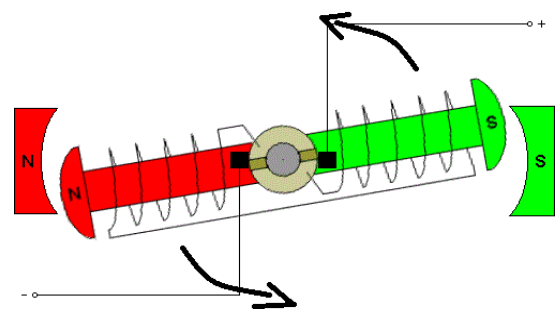
Dadurch stoßen sich die _____ Magnetpole ab und die _____ ziehen sich an und die Spule beginnt sich zu drehen, in unserem Beispiel _____ den Uhrzeigersinn.



Die Spule dreht sich weiter bis sich entgegengesetzte Pole gegenüberstehen und die Bürsten die _____ zwischen den Halbringen berühren. Dadurch wird der _____ unterbrochen und das _____ der Spule baut sich ab.



Die Spule dreht sich aber wegen ihrer _____ weiter und der Stromkreis schließt sich wieder. Es kommt dann zur _____ des Spule und die dann _____ Pole der beiden Magneten stoßen sich ab. Der Vorgang wiederholt sich und es kommt zur Drehung der Spule.



III. Literaturverzeichnis

Zeitschriftartikel und wissenschaftliche Aufsätze:

- [1] Milroy, R.A.: Hydrodynamic Gyroscope; In: Journal of Applied Mechanics (1967)
Vol. 34, S.525
- [2] Watson, D.B.: The force on an electrically conducting cylinder rolling on parallel rails;
In: Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 30 (1997), S. 2176-2182
- [3] Watson, D.B.; Patel, S.M.; Sedcole, N.P.: Ball-bearing motor effect with rolling cylinders;
In: IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology, Vol. 146, Nr. 2 (1999),
S. 83-87
- [4] Watson, D.B.; Bellam, G.R.; Leung, W.Y.V.; Nolan, S.P.: Investigations into the roller
electrical motor; In: Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 32 (1999), S. 741-748
- [5] Hatzikonstantinou, P.; Moyssides, P.G.: Explanation of the ball bearing motor and exact
solutions of related Maxwell equations; In: Journal of Physics A: Mathematical and
General, Vol. 23(1990), S. 3183-3197
- [6] Watson, D.B.; Watson, W.R.: Ball Bearing and Rolling Cylinder Motors; In IEEE
Transactions on Magnetics, Vol. 35 (1999); S. 562-567
- [7] McDonald, K.T.: Ball-bearing Motor (2011)
- [8] Mills, A.A.: The Ball-Bearing Electric Motor; In: Physical Education, Vol. 15 (1980)
- [9] Gruenberg, H.: The ball bearing as a motor; In: American Journal of Physics, Vol. 46
(1978), S. 1213-1219
- [10] Marinov, S.: The intriguing ball-bearing motor, In: Electronics and Wireless World
magazine (1989)
- [11] Watson, D.B.; Watson, A.M.: Non-ferromagnetic linear ball-bearing motor; In: Journal
of Physics D: Applied Physics, Vol. 29; S. 529-532
- [12] Hatzikonstantinou, P.; Moyssides, P.G.; Ball Bearing Motors; In: IEEE Transactions on
Magnetics, Vol. 33. (1997)

Buchquellen:

- [13] Hammer, Hammer: Physikalische Formeln und Tabellen; J. Lindauer Verlag München,
2002
- [14] Frey, K.: Die Projektmethode; Weinheim Verlag, 2007, S. 54 ff.
- [15] Wiater, W.: Unterrichtsprinzipien; Auer Verlag, 2012

Uniprotokolle:

[16] Heiszler, F. J.: Vorlesung „spezielle Fachdidaktik“ Universität Augsburg;
Sommersemester 2012

[17] Wilhelm, T: Vorlesung „allgemeine Fachdidaktik“ Universität Augsburg;
Wintersemester 2011/12

Internetquellen:

[18] <http://www.nuetec-forschung.de/kugellagermotor/Kugellagermotor.htm> Stand:
24.02.2015

[19] <http://ddi.cs.uni-potsdam.de/Forschung/VortragsfolienProjektunterricht.pdf>
Stand: 24.02.2015

[20]
<https://www.isb.bayern.de/realschule/lehrplan/realschule-r6/fachprofil-ebene-2/physik/804/>
Stand: 24.02.2015; Lehrplan für die bayrische sechsstufige Realschule

[21]
http://uni-protokolle.de/Lexikon/Perpetuum_Mobile.html#Perpetuum_Mobile_zweiter_Art
Stand: 24.02.2015

[22]
https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nawi.inst.251/Didactics/thermodynamik/INHALT/HS2.HTM
Stand: 25.02.2015

[23] <http://nibis.ni.schule.de/~ursula/Physik/ELehre/Elektromotor.htm>
Stand: 27.02.2015

[24]
<http://www.zebis.ch/Unterricht/schublade/zpvksZHP4bFpgdsz4MRuzvZMGyEXwK/docs/Projektmethode.pdf>
Stand: 02.03.2015

[25]
http://www.isb.bayern.de/download/1707/08-09-23_erziehungskonkret_klassenklima.pdf
Stand: 03.03.2015

[26] <http://www.zajimavedarky.cz/images/stories/virtuemart/product/gyroskop.jpg>

Stand: 13.03.2015

[27] http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_7/illustr/t7_1_2.html

Stand: 13.03.15

[28] <http://hug-technik.com/inhalt/ta/metall.htm>

Stand: 15.03.15

[29] <http://ogerstung.de/tabellen/physik.html>

Stand: 15.03.15

[30] <http://gyroskop.org/>

Stand: 15.03.15

Sonstiges:

[31] Stahlschlüssel – Key to Steel

IV. Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: Aufbau eines Gyroskops

Abb. 2: Versuchsaufbau von Milroy

Abb. 3: Kugellagermotor

Abb. 4: Roller Electrical Motor (REM)

Abb. 5: klassischer Versuchsaufbau zur Lorentzkraft

Abb. 6: Erklärungsversuch McDonald (2011)

Abb. 7: Watsons Kugel auf Schienen

Abb. 8: Versuchsergebnisse bei unterschiedlichem Schienenabstand

Abb. 9: Versuchsergebnisse bei unterschiedlichem Durchmesser

Abb. 10: Versuchsergebnisse bei unterschiedlicher Masse

Abb. 11: Belasteter REM

Abb. 12: Versuchsergebnisse bei höheren Massen

Abb. 13: Versuchsaufbau von Watson zur Untersuchung der Materialien

Abb. 14: Veranschaulichung der unterschiedlichen Winkeleinstellungen

Abb. 15: Kraft auf verschiedene Materialien als Leiter

Abb. 16: Kraft auf hohle Leitungsstücke

Abb. 17: Stahlschlüssel

Abb. 18: Kraft auf den Leiter gegen dessen Geschwindigkeit

Abb. 19: REM

Abb. 20: Kugellagermotor

Abb. 21: Aufbau Elektromotor

Abb. 22: der Roller Electrical Motor oder Rollen-Motor

Abb. 23: Kugellagermotor